



Universidad  
Carlos III de Madrid

Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones

## PROYECTO FIN DE CARRERA

Ingeniería Técnica de Telecomunicación, Sistemas de Telecomunicación

# SOLUCIÓN PARA ENTORNOS CON COBERTURA ESPORÁDICA EN LTE

Autor: Javier Botana Rivera

Tutor: Raquel Pérez Leal

Leganés, octubre de 2015



# PROYECTO FIN DE CARRERA

## SOLUCIÓN PARA ENTORNOS CON COBERTURA ESPORÁDICA EN LTE

### AUTOR

Javier Botana Rivera

### TUTORA

Raquel Pérez Leal

La defensa del presente Proyecto Fin de Carrera se realizó el día 23 de octubre de 2015, siendo evaluada por el siguiente tribunal:

Víctor P. Gil Jiménez

Ana García Armada

María Carmen Calderón Pastor

Y habiendo obtenido la siguiente CALIFICACIÓN:

Leganés, a 23 de octubre de 2015

---

## I AGRADECIMIENTOS

Agradecer a mi tutora Raquel Pérez Leal su dedicación, disposición, paciencia y tiempo que han hecho posible la realización de este proyecto.

A mi familia por su apoyo incondicional durante todos estos años y por el ánimo que me han dado.

A Patricia por haber estado siempre a mi lado, por su paciencia, comprensión y ayuda para conseguir mis objetivos y metas

Y a todas las personas que de una u otra forma me han apoyado en la realización del proyecto, Gracias.

---

## II RESUMEN

Este proyecto surge de la necesidad, cada día más importante, de estar constantemente conectado. Desde los primeros sistemas de telefonía móvil hasta hoy, la conexión de los usuarios a la red ha ido creciendo exponencialmente, pero a la vez se ha ido incrementando lo que se conoce como brecha digital, ya que sigue existiendo un escollo en las conexiones en entornos rurales. Debido a la dispersión de la población, a la orografía y al bajo retorno de la inversión para los operadores, las zonas rurales y de montaña siempre han visto limitada su cobertura y su velocidad.

LTE (Long Term Evolution) es un nuevo salto en la evolución de la telefonía móvil, proporcionando diversas ventajas respecto a los sistemas anteriores. Las principales ventajas que proporciona en entornos rurales son que ha sido diseñado para obtener las máximas prestaciones en radios de cobertura de hasta 30 Km, su baja latencia y su escalabilidad espectral. Lo que ayuda a utilizando un menor número de nodos, llegar a cubrir un mayor territorio.

A pesar de las mejoras, siguen existiendo puntos de especial interés que será muy difícil que puedan estar cubiertos por LTE y de esta necesidad surge este proyecto.

Para ello se ha realizado el estudio previo de la cobertura 2G/3G que existe actualmente en una zona concreta, sobre la que se basa el proyecto. Para llevar a cabo este estudio se han realizado mediciones de los niveles de señal en una ruta de senderismo muy frecuentada en la sierra de Madrid.

A continuación, se ha realizado una simulación de cobertura de las diferentes frecuencias de LTE que están utilizando los operadores españoles en su red. Para valorar cual es la que mejores prestaciones proporciona en la zona de estudio.

Finalmente se han analizado y simulado dos propuestas para la mejora de la señal recibida en entornos con cobertura esporádica. Ambas propuestas se basan en la utilización de un terminal intermedio, entre el nodo y el terminal sin cobertura, que actuará como repetidor o punto de acceso para el terminal sin cobertura. Para la conexión del terminal intermedio y el terminal sin cobertura se han analizado dos opciones: la utilización del sistema LTE y la utilización de WiFi.

Debido principalmente a su mayor propagación de la señal se ha elegido utilizar LTE en la banda de 800 MHz y como terminal intermedio un sistema LTE ya que en las pruebas realizadas demostraba una cobertura mayor con unos mejores niveles de señal que la opción WiFi.

---

### III ABSTRACT

Mobile communication systems have limited coverage and throughput in rural and mountain areas due to the dispersion of the population, sparsely populated areas, the topography and the low deployment of nodes.

LTE is the next step in the technical evolution of 2G/3G networks. LTE offers several advantages compared to previous systems in rural environments. The main advantages provided in rural areas are: it is designed for maximum performance in coverage radius up to 30 km, very low latency and flexibility on spectrum bandwidth. Because of these characteristics with fewer nodes, than 3G, you can cover the same area.

Despite the LTE improvements, there are points of special interest that will be very difficult to cover. This is the reason for this project, which objective is to extend coverage in rural areas.

For this reason, I have completed a preliminary study of the 2G/3G coverage that exists in a particular area. To carry out this study, I have made measurements of signal levels (drive test) in a very popular hiking route in Madrid.

Then, I made simulation of coverage for the different frequency bands used for LTE in Spain. To evaluate which is the best performance provided in the study area.

Finally I have analyzed and simulated two options to improve the received signal in environments with sporadic coverage. Both options are based on the use of an intermediate terminal between the node and the terminal without coverage, which will act as a repeater or access point for the terminal without coverage. For connecting the intermediate terminal and the terminal without coverage I have analyzed two options: using LTE system and the use of WiFi.

Because of their greater signal propagation I have chosen to use LTE in the 800 MHz band and LTE system for the intermediate terminal. The tests showed greater coverage with better signal levels than the WiFi option.

---

# ÍNDICE GENERAL

<b>INDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>9</b>
<b>INDICE DE TABLAS .....</b>	<b>11</b>
<b>GLOSARIO .....</b>	<b>12</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>15</b>
1.1 INTRODUCCIÓN.....	15
1.2 OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO .....	15
1.3 FASES DE DESARROLLO .....	17
1.4 MEDIOS EMPLEADOS .....	17
1.5 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA .....	18
<b>2 PROBLEMAS EN ENTORNOS CON COBERTURA ESPORÁDICA ..</b>	<b>20</b>
2.1 INTRODUCCIÓN.....	20
2.2 PROBLEMÁTICA CON LOS SISTEMAS ACTUALES .....	20
2.3 EJEMPLO DE COBERTURA ACTUAL CON REDES 2G/3G .....	22
2.3.1 Cobertura teórica .....	23
2.4 MEDIDAS DE COBERTURA.....	26
2.4.1 Resultados de las medidas.....	27
2.5 REQUISITOS QUE TENDRÍAN QUE TENER LAS SOLUCIONES .....	31
<b>3 SOLUCIONES DE MEJORA DE COBERTURA EN LTE .....</b>	<b>34</b>
3.1 INTRODUCCIÓN.....	34
3.2 ARQUITECTURA GENERAL .....	35
3.3 EL CORE NETWORK .....	36
3.4 LA RED DE ACCESO .....	37
3.4.1 Evolved NodoB .....	38
3.4.2 Interfaz radio.....	38
<b>4 SOLUCIONES EXISTENTES PARA LA EXTENSIÓN Y MEJORA DE LA COBERTURA.....</b>	<b>52</b>
4.1.1 Basadas en retransmisores.....	52
4.1.2 Basadas en utilización de terminales .....	56
<b>5 SIMULACIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>59</b>
5.1 OBJETIVOS Y ESCENARIO DE SIMULACIÓN .....	59
5.2 DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR .....	60
5.2.1 Configuraciones genéricas del simulador .....	62
5.3 CONSIDERACIONES DE LA UTILIZACIÓN DE DIFERENTES BANDAS EN LTE.....	64
5.4 SIMULACIÓN CON REPETIDOR .....	76
5.5 CONCLUSIONES.....	79
<b>6 NUEVAS SOLUCIONES PARA LA EXTENSIÓN Y MEJORA DE LA COBERTURA.....</b>	<b>81</b>

6.1	INTRODUCCIÓN.....	81
6.2	CONSIDERACIONES GENERALES.....	81
6.3	SOLUCIÓN BASADA EN NODO LTE Y TERMINAL INTERMEDIO. ....	82
6.3.1	<i>Terminal intermedio LTE</i> .....	85
6.3.2	<i>Terminal intermedio WIFI</i> .....	104
<b>7</b>	<b>RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN .....</b>	<b>111</b>
7.1	INTRODUCCIÓN.....	111
7.2	SOLUCIÓN CON TERMINAL INTERMEDIO LTE .....	112
7.3	SOLUCIÓN CON TERMINAL INTERMEDIO WIFI.....	119
7.4	RESULTADOS .....	122
7.4.1	<i>Análisis comparativo de resultados</i> .....	123
<b>8</b>	<b>PRESUPUESTO DEL PROYECTO.....</b>	<b>128</b>
<b>9</b>	<b>CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO .....</b>	<b>130</b>
<b>10</b>	<b>APÉNDICES .....</b>	<b>132</b>
10.1	MASTER INFORMATION BLOCK Y SYSTEM INFORMATION BLOCK .....	132
10.2	MAPA TOPOGRÁFICO DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	134
10.3	CRONOGRAMA: FASES DEL PROYECTO .....	135
<b>11</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>136</b>



---

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Zona de análisis con los principales lugares .....	23
Figura 2.2. Población con acceso a redes 3G/UMTS (%).....	24
Figura 2.3. Cobertura 2G actual en la zona de estudio .....	25
Figura 2.4. Cobertura 3G (900MHz y 2100MHz) actual en la zona de estudio .....	25
Figura 2.5. Cobertura 4G (1800MHz/2600MHz) actual en la zona de estudio .....	26
Figura 2.6. Características del terminal de medidas .....	27
Figura 2.7. Rangos de los niveles de señal de las medidas .....	27
Figura 2.8. Vista general de los niveles de señal de la ruta.....	28
Figura 2.9. Detalle de los niveles de señal de la primer parte de la ruta .....	29
Figura 2.10. Detalle de los niveles de señal de la segunda parte de la ruta.....	30
Figura 2.11. Altimetría de la ruta.....	30
Figura 2.12. Detalle de la orografía de la ruta .....	31
Figura 3.1. Arquitectura del sistema LTE [8] .....	34
Figura 3.2. Componentes e interfaces fundamentales del sistema LTE [9].....	35
Figura 3.3. Mecanismos de transferencia de la información en el canal radio [8]..	39
Figura 3.4. Protocolos de la interfaz radio de E-UTRAN [8].....	40
Figura 3.5. Relación entre los canales lógicos, de transporte y físicos en el enlace descendente. [19] .....	45
Figura 3.6. Relación entre los canales lógicos, de transporte y físicos en el enlace ascendente. [19] .....	46
Figura 3.7. Acceso inicial .....	46
Figura 3.8. Grupos de PCIs .....	47
Figura 3.9. Ubicación en la estructura frecuencia-tiempo de los canales comunes de control y señales de referencia para el enlace descendente [8].....	48
Figura 3.10. Acceso basado en contienda .....	50
Figura 4.1 Relay en banda [29] .....	54
Figura 4.2 Relay fuera de banda [29] .....	54
Figura 4.3. Oportunidad-Driven Multiple Access .....	56
Figura 4.4. Todos los dispositivos despiertan un breve periodo de tiempo para buscar, transmitir o recibir [32].....	58
Figura 5.1. Vista general y lugares destacados de la zona de estudio .....	60
Figura 5.2. Método de propagación Rec. UIT-R P.526 [35] .....	63
Figura 5.3. Comparativa modelo COST-231 Hata en las diferentes frecuencias .....	66
Figura 5.4. Atenuación específica en zona boscosa en función de la frecuencia Rec. UIT-R P.833-4 [40] .....	67
Figura 5.5. Diagrama horizontal de radiación de la antena del eNodoB.....	69
Figura 5.6. Diagrama vertical de radiación de la antena del eNodoB a 0° y 180° ...	70
Figura 5.7. Diagrama horizontal de la antena del terminal móvil .....	71

Figura 5.8. Diagrama vertical a 0° de la antena del terminal móvil (a 180° sería un diagrama simétrico) .....	71
Figura 5.9. Rango de valores de la señal.....	72
Figura 5.10. Simulación LTE 800MHz.....	73
Figura 5.11. Simulación LTE 1800MHz .....	74
Figura 5.12. Simulación LTE 2600MHz.....	75
Figura 5.13. Repetidor de telefonía móvil con placas solares y generador eólico ....	77
Figura 5.14. Simulación LTE 800Mhz con repetidor .....	79
Figura 6.1 Plano de Usuario .....	86
Figura 6.2 Plano de Control .....	86
Figura 6.3 Diagrama de flujo LTE intermedio .....	88
Figura 6.4 Proceso de búsqueda UE sin cobertura .....	92
Figura 6.5 Solo el sector amarillo tendría la “búsqueda de terminales sin cobertura” activada .....	93
Figura 6.6 Agrupación de PCI.....	94
Figura 6.7 Formación de la conexión.....	96
Figura 6.8 Multiplexación usuarios .....	97
Figura 6.9 Separación temporal enlaces.....	98
Figura 6.10 TDM entre acceso y backhaul con MBSFN .....	99
Figura 6.11 Canales PDCCH y R-PDCCH.....	100
Figura 6.12 Retardos de propagación [48] .....	101
Figura 6.13 Retardo previo [48].....	101
Figura 6.14 Alineación de subtramas [48].....	101
Figura 6.15 Enlaces de Backhaul y acceso UL [48] .....	103
Figura 6.16 UE_R como eNB .....	103
Figura 6.17 Arquitectura del servicio de portadores .....	104
Figura 6.18 Enlaces WiFi y LTE.....	105
Figura 6.19 Diagrama de flujo WiFi intermedio.....	106
Figura 6.20 Fase de descubrimiento.....	108
Figura 6.21 Esquema unión redes WiFi- LTE .....	110
Figura 7.1 Puntos de referencia para la simulación.....	112
Figura 7.2 Alcance medio del UE_R LTE .....	114
Figura 7.3 Comparación de los diferentes puntos mediante la utilización de un terminal intermedio LTE.....	116
Figura 7.4 Solape de celdas con terminal intermedio LTE .....	117
Figura 7.5 Celda mejor servidora con terminal intermedio LTE .....	118
Figura 7.6 Niveles de señal WiFi.....	120
Figura 7.7 Alcance medio del UE_R WiFi .....	120
Figura 7.8 Coberturas del terminal intermedio WiFi .....	121
Figura 7.9 Combinación puntos A-E.....	122

---

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Frecuencias LTE 800MHz .....	32
Tabla 2.2. Frecuencias LTE 1800MHz. ....	32
Tabla 2.3. Frecuencias LTE 2600MHz .....	32
Tabla 5.1. Parámetros básicos del eNodeB .....	69
Tabla 5.2. Parámetros básicos del terminal móvil .....	70
Tabla 5.3. Método y parámetros para el cálculo de la cobertura .....	71
Tabla 5.4. Cartografía .....	72
Tabla 6.1 Comparativa tecnologías .....	83
Tabla 6.2 Elementos Normalizados .....	85
Tabla 6.3 Primer slot .....	102
Tabla 6.4 Segundo slot .....	102
Tabla 6.5 Información elementos RRC.....	109
Tabla 7.1 Parámetros del UE, UE_R y eNB .....	113
Tabla 7.2 Parámetros UE_R WiFi .....	119
Tabla 7.3 Parámetros terminal WiFi.....	119
Tabla 7.4 Comparativa LTE-WiFi .....	127
Tabla 8.1 Software empleado .....	128
Tabla 8.2 Coste de personal .....	128
Tabla 8.3 Coste de equipos y software .....	129
Tabla 8.4 Otros costes directos .....	129
Tabla 8.5 Resumen de costes .....	129

ACK	Acknowledged (Asentimiento)
BCCH	Broadcast Control Channel (Canal de control de diffusion)
BCH	Broadcast Channel (Canal de diffusion)
BER	Bit Error Rate (Tasa de error de Bit)
BSC	Base Station Controller (Controlador de Estaciones Base)
CDMA	Code Division Multiple Access (Acceso Múltiple por División de Código)
CQI	Channel Quality Indication (Indicación de calidad del canal)
CN	Core Network (Núcleo de red)
CS	Dominio de servicio de conmutación de circuito
DCI	Downlink Control Information
DL	Downlink (Canal descendente)
DRX	Discontinuous Reception (Recepción discontinua)
D2D	Device to device (Comunicación directa entre terminales)
EPS	Evolved Packet System
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (Acceso Radio Terrestre de UMTS evolucionado)
EPC	Evolved Packet Core
FDM	Frecuence Division Multiplexing (Multiplexación por division en frecuencia)
GSM	Global System for Mobile communication (Sistema Global para Comunicaciones Móviles)
GPRS	General Packet Radio Service (Servicio General de Paquetes Vía Radio)
GW	Gateway (Puerta de enlace)

HO	Handover (Traspaso del UE de una celda a otra)
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access (Alta velocidad del acceso de paquetes en el enlace descendente)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica)
ITU	International Telecommunication Unit (Unión Internacional de Telecomunicaciones)
IP	Internet Protocol (Protocolo de Internet)
LA	Location Area (Área de localización)
LTE	Long Term Evolution (Evolución a Largo Plazo)
MIMO	Multiple Input Multiple Output (Múltiples entradas múltiples salidas)
MAC	Medium Access Control (Control de Acceso al Medio)
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access (Acceso Múltiple Ortogonal por División de Frecuencia)
PCI	Physical Cell Identity (Identificador Físico de Celda)
PDCCH	Physical Downlink Control Channel (Control del canal físico del enlace descendente)
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PS	Dominio de servicio de conmutación de paquete
PSS	Primary Synchronization Signal (Señal primaria de sincronización)
PUCCH	Physical Uplink Control Channel (Control del canal físico del enlace ascendente)
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel (Canal físico compartido del enlace ascendente)
P-GW	Packet Data Network Gateway
QoS	Quality of Service (Calidad de Servicio)
RA	Routing Area (Área de enrutamiento)
RAN	Radio Access Network

RB	Resource Blocks (Bloques de recursos)
RNC	Radio Network Controller (Controlador de la radio de la red)
RRC	Radio Resource Control (Control de los Recursos Radio)
S-GW	Serving Gateway
SC-FDMA	Single Carrier-Frequency Division Multiple (Acceso múltiple por división de frecuencia de portadora única)
SSS	Secondary Synchronization Signal (Señal secundaria de sincronización)
TDD	Time Division Duplexing (duplexación por división de tiempo)
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System (Sistema universal de telecomunicaciones móviles)
UL	Uplink (Canal ascendente)
UE	User equipment (Equipo de Usuario)
1G	Primera generación de telefonía móvil
2G	Primera generación de telefonía móvil
3G	Primera generación de telefonía móvil
3GPP	3rd Generation Partnership Project (3ª Generación del Proyecto de Asociación)
4G	Primera generación de telefonía móvil

---

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 INTRODUCCIÓN

Desde los primeros sistemas de comunicaciones móviles celulares en los años 80 la tecnología ha tenido una vertiginosa evolución. Se pasó de una tecnología analógica a una tecnología digital, desde las primeras redes AMPS hasta las actuales redes LTE o de cuarta generación.

Las redes de cuarta generación o LTE introducen importantes mejoras respecto de los sistemas de comunicaciones anteriores. El más destacado es que por primera vez toda la red y todos los servicios utilizarán el protocolo IP, las llamadas de voz, datos, señalización... todo se encapsulara en paquetes IP. Con ello se pretende simplificar equipos y protocolos, que con las distintas evoluciones se habían ido haciendo cada vez más complejos, por tener que manejar por un lado los datos y por otro lado la voz.

A pesar de todos los avances, la cobertura de estos sistemas sigue siendo limitada, existiendo impedimentos para poder proporcionar cobertura en todos los lugares deseados. El espectro a utilizar y la potencia a la que se puede radiar son limitados. También existen dificultades para desplegar nuevas estaciones, debido a factores geográficos, económicos y sociales. Estos impedimentos provocan que sigan existiendo lugares sin cobertura.

## 1.2 OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

El objetivo del proyecto final de carrera es dotar de cobertura LTE zonas montañosas y rurales en las que existe un déficit de cobertura.

Actualmente no es posible dotar de cobertura la totalidad del terreno. Existen diversos impedimentos para llevar a cabo esto:

- Factores económicos: los operadores de telefonía móvil busca rentabilidad en sus despliegues. Hay zonas que por su escasa población o por su dificultad para desplegar las infraestructuras de telecomunicaciones necesarias no sería rentable, por lo que quedan huecos de cobertura difíciles de cubrir.

- Factores geográficos: lugares montañosos o con densa vegetación son difíciles de cubrir debido a la falta de infraestructuras y dificultad para instalar y mantener los equipos de telecomunicaciones necesarios.
- Factores sociales [1]: el desarrollo de la telefonía móvil ha experimentado un crecimiento casi exponencial, que ha supuesto una proliferación caótica de redes de telecomunicaciones y un aumento significativo de la contaminación electromagnética y de la percepción social del riesgo asociado a estas infraestructuras.

En este proyecto final de carrera se buscará una solución sencilla y económica para dotar de cobertura zonas montañosas en la que se realicen actividades de montaña (senderismo, escalada, alpinismo...) y que tengan una afluencia puntual de personas, principalmente durante los fines de semana y vacaciones. En estos lugares no resulta económicamente rentable realizar un despliegue de estaciones móviles. El principal motivo para dotar estos lugares de cobertura, es poder tener una vía de comunicación en caso de emergencia.

Se ha elegido la utilización de una red LTE ya que es una tecnología de futuro, con unos estándares suficientemente sólidos, ya que están basados en lo aprendido de las generaciones anteriores. Al mismo tiempo es una tecnología joven, por lo que aún se están desarrollando nuevas especificaciones y mejoras. Resultaría sencillo poder incluir mejoras en los estándares o protocolos, que pudieran surgir en este proyecto. Si se utilizaran otras tecnologías como el GSM o UMTS, mucho más maduras, sería muy complicado introducir nuevas especificaciones, ya que los mayores esfuerzos en investigación y desarrollo están centrados en LTE.

También se ha elegido utilizar LTE ya que cuando esta tecnología se vaya extendiendo, se aprovecharán la mayoría de los emplazamientos que actualmente poseen los operadores con otras tecnologías móviles. En las zonas que se estudiarán en el proyecto, los nodos se encuentran en los núcleos urbanos o muy próximos, por lo que el LTE también se podrá aprovechar como una forma económica de ofrecer acceso a internet de alta capacidad, sin el coste que tiene el despliegue de redes fijas.

Uno de los inconvenientes que hay que solventar en el proyecto, es que estos nodos están diseñados para dar cobertura a los núcleos urbanos, carreteras o zonas de tránsito de personas, por lo que habrá que buscar soluciones para que también puedan cubrir zonas más alejadas de los núcleos urbanos, que es donde se encuentran las zonas donde se realizan las actividades de montaña.



Para el estudio que en este proyecto se va a llevar a cabo, se ha escogido una zona de la sierra de Madrid sobre la que se realizarán las pruebas y simulaciones necesarias. En la zona elegida existe un núcleo urbano principal de 2000 habitantes y varios puntos de interés turístico y rutas de senderismo y de bicicleta de montaña.

### 1.3 FASES DE DESARROLLO

El desarrollo de este proyecto ha sido realizado en varias fases:

- Fase 1: Estudio de la situación actual de las redes 2G/3G en entornos con cobertura esporádica mediante el estudio teórico y medidas de cobertura.
- Fase 2: Estudio de las soluciones de mejora de cobertura que propone LTE, realizando previamente una revisión del funcionamiento de LTE. Simulación de cobertura de un nodo LTE con diferentes configuraciones y de un repetidor.
- Fase 3: Planteamiento de soluciones para la extensión de cobertura mediante la utilización de un terminal intermedio. Proposición de cambios, mejoras y soluciones alternativas en los estándares de LTE para adaptarlo a las necesidades propuestas.
- Fase 4: Simulación de las diferentes opciones elegidas para poder realizar una elección de la mejor solución.
- Fase 5: Extracción de conclusiones

### 1.4 MEDIOS EMPLEADOS

La herramienta utilizada para llevar a cabo todas las simulaciones es XIRIO-Online, desarrollado por la empresa APTICA [2]. Para la toma de medidas se ha utilizado la app Netmonitor [3] instalada en un termino Android.

## 1.5 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

Para poder facilitar la comprensión y lectura del proyecto se incluye una breve descripción de cada uno de los capítulos descritos a lo largo de la memoria:

- Capítulo 1. Este capítulo incluye una breve descripción sobre los objetivos y la justificación del proyecto. Además incluye las fases de desarrollo, previas a la redacción de la memoria.
- Capítulo 2. Se realiza un análisis de cómo se encuentran las actuales redes 2G y 3G en entornos con cobertura esporádica y de la problemática de los sistemas actuales. Se realizan una serie de medidas de campo en un entorno que se utilizará durante todo el proyecto para realizar las diferentes pruebas y simulaciones. Por último se enumeran los requisitos que deben tener las soluciones para entornos con cobertura esporádica.
- Capítulo 3. En este capítulo se comienza con una revisión de los principios básicos de LTE. Posteriormente se realiza un estudio en profundidad de la interfaz radio, sus protocolos y canales, y se analiza el funcionamiento del acceso inicial en LTE. Es necesario realizar este estudio centrado en los canales de sincronización y control de la interfaz radio, ya que las soluciones propuestas utilizan dichos canales.
- Capítulo 4. En primer lugar se describe y analiza la herramienta utilizada en las simulaciones, XIRIO-Online. En segundo lugar se analizan las diferentes posibilidades existentes en cuanto a la utilización de LTE en entornos rurales, utilización de las diferentes bandas de frecuencias y extensión de cobertura mediante un repetidor. Para ello se realiza una comparativa entre las diferentes frecuencias licenciadas en España para LTE y se simulan los diferentes escenarios, seleccionando la banda de frecuencia más adecuada en cuanto a los requerimientos de un entorno rural. También se realiza una simulación de cobertura con la frecuencia previamente seleccionada y un repetidor. Para finalizar se analizan todos los resultados y se obtienen conclusiones.
- Capítulo 5. A partir de las conclusiones anteriores se plantean nuevas soluciones para la extensión y mejora de la cobertura mediante la utilización de un terminal intermedio. Para ello se analizan diferentes tecnologías actuales y su posible utilización para este fin. Se realizan dos propuestas, la utilización de un terminal intermedio LTE y un terminal intermedio WiFi. Para ambas propuestas se estudian y plantean modificaciones de los

diferentes estándares implicados para incluir la opción de extensión de cobertura.

- Capítulo 6. Se simulan las dos opciones resultantes del capítulo 5, para analizar su viabilidad. Se realiza un análisis comparativo de las dos opciones, seleccionando la más adecuada.
- Capítulo 7. Presupuesto estimado por la realización del proyecto.
- Capítulo 8. Conclusiones y líneas de trabajo que se podría desarrollar a partir de este proyecto.
- Capítulo 9. Apéndices y otros datos.
- Capítulo 10. Este capítulo muestra las referencias que han sido consultadas para el desarrollo del proyecto.

---

## 2 PROBLEMAS EN ENTORNOS CON COBERTURA

### ESPORÁDICA

#### 2.1 Introducción

Con cada nueva generación de telefonía móvil se intentan mejorar todos los aspectos posibles de las generaciones anteriores y se intenta satisfacer las nuevas necesidades que puedan surgir.

En este capítulo en un primer lugar se analizan algunos problemas que las redes actuales tienen en entornos montañosos y rurales, donde la cobertura en algunas zonas puede ser esporádica. Para ello se han llevado a cabo simulaciones generales de la zona y posteriormente medidas en la zona a analizar.

En último lugar se han descrito los requisitos que tendrían que tener las soluciones en función de lo analizado con anterioridad.

#### 2.2 Problemática con los sistemas actuales

Las zonas montañosas y rurales suelen tener una carencia de infraestructuras de comunicación, debido principalmente a su escasa o dispersa población, que hace poco rentable un despliegue de infraestructuras. Esta falta de rentabilidad no solo es debida a la baja densidad de población, también suelen ser zonas de difícil acceso y a varios kilómetros de poblaciones más grandes. Solo resulta rentable un despliegue en zonas de estas características si poseen un lugar con gran afluencia de personas como pueden ser estaciones de esquí o lugares de importancia turística.

Esta situación conlleva la desigualdad de acceso a las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) entre los habitantes de zonas rurales o montañosas y los habitantes de núcleos urbanos, en los que sí existen accesos de banda ancha, esto es conocido como brecha digital [4].

El poder tener acceso a redes de banda ancha desde cualquier parte es algo que se está convirtiendo en vital, ya que brindan una serie de servicios, a parte del ocio, que en lugares aislados resultan de gran ayuda. Algunos ejemplos son:

- Telemedicina: Las aplicaciones en telemedicina y salud en línea permiten reducir desplazamientos y en casos de emergencia poder tener acceso

instantáneo al historial de los pacientes, diagnósticos médicos.... También resultan posibles la adquisición de suministros médicos y la prescripción de recetas en línea. Cabe asimismo efectuar un seguimiento electrónico capaz de aportar importantes beneficios a quienes necesitan asistencia permanente.

- **Administración electrónica:** La banda ancha mejora las posibilidades de prestación de servicios de administración electrónica y permite una mejor interacción entre administraciones, facilitando el acceso a las mismas de ciudadanos y empresas. Se puede mejorar el rendimiento de las organizaciones, contribuyendo a una mayor eficiencia de las administraciones públicas.
- **Educación:** La banda ancha refuerza el proceso de aprendizaje y permite a los estudiantes formarse en tiempo real con profesores cualificados en áreas en las que no se cuente con otra opción. Los estudiantes pueden acceder a recursos educativos alternativos y conocer nuevas formas de contenidos. También se abre las puertas a la videoconferencia y se facilita la colaboración entre instituciones.

Como se puede comprobar la banda ancha ofrece innumerables ventajas. Por ello hay que buscar infraestructuras de comunicación que satisfagan todas estas necesidades, siendo rentables. Y más teniendo en cuenta que en España la población rural representa más de un 20% de la población total. Este porcentaje aumenta significativamente en épocas estivales y en los fines de semana. Toda esta población, habitando de forma permanente u ocasional, tiene problemas para acceder a la banda ancha. En otras partes del mundo el porcentaje de población que reside en entornos rurales y de montaña es aún mayor, llegando al 50% en zonas de Asia Pacífico.

Para evitar que la brecha digital [4] siga aumentando, es necesario proveer servicios de banda ancha al mayor número de personas posible. En esta línea se están proponiendo diversas tecnologías como WIMAX, LTE, redes de fibra, redes vía satélite... Ya que las actuales, como se verá a continuación, no consiguen satisfacer todas las necesidades.

Actualmente en zonas rurales y de montaña se puede tener acceso a la RTB, que proporcionan servicios de voz y un servicio de datos con una velocidad baja/media y sin movilidad. También se puede tener acceso a redes de telefonía móvil 2G/3G, pero sin llegar a proporcionar los servicios necesarios.

Las redes 2G, que trabajan en la banda de 900MHz, tiene buena propagación y proporcionan zonas amplias de cobertura, pero solo son útiles para llamadas de voz y datos a baja velocidad.

Las redes 3G, que utilizan la banda de 2100MHz, tienen el problema de que al ser una frecuencia alta su propagación es menor. Desde hace unos años, en España también se utiliza la banda de 900MHz para la tecnología UMTS, lo que proporciona una cobertura similar al 2G con una tasa de datos superior, pudiendo llegar como máximo a unos 22Mbps.

Con la tendencia actual, en la que las aplicaciones requieren cada vez una cantidad de datos mayor, esta velocidad puede no ser suficiente. Por lo que se hace necesario confiar en las nuevas tecnologías para que solucionen estos problemas, como son la cuarta generación de tecnologías de telefonía móvil.

## 2.3 Ejemplo de cobertura actual con redes 2G/3G

Como caso tipo de la problemática que se pretende estudiar se ha escogido una zona en la sierra de Madrid con un núcleo urbano principal y varias zonas de actividades de recreo, rutas de senderismo y de montaña. El núcleo urbano principal de la zona es la localidad de Rascafría, con unos 2000 habitantes.

Existen varios puntos de interés turístico, los más importantes son el Monasterio de Santa María de El Poular y las piscinas naturales Las Presillas. En la zona también existen numerosas rutas de senderismo y de bicicleta de montaña. Destaca la ruta de senderismo conocida como Las Cascadas del Purgatorio, que discurre entre el Monasterio de Santa María de El Poular hasta La Cascada del Purgatorio, pasando por las inmediaciones del Albergue Juvenil Los Batanes y las Piscinas naturales.

Esta ruta será el eje central donde se realizarán las simulaciones y medidas, ya que en una única ruta y en sus inmediaciones, se concentran diferentes escenarios, que podrían extrapolarse a otros lugares.

- Enclaves turísticos, donde se concentran un gran número de personas: Monasterio de Santa María de El Poular, Albergue Juvenil Los Batanes y Piscinas naturales.
- Núcleos urbanos
- Rutas de senderismo y bicicleta de montaña de diferentes dificultades.
- Zonas montañosas de difícil acceso

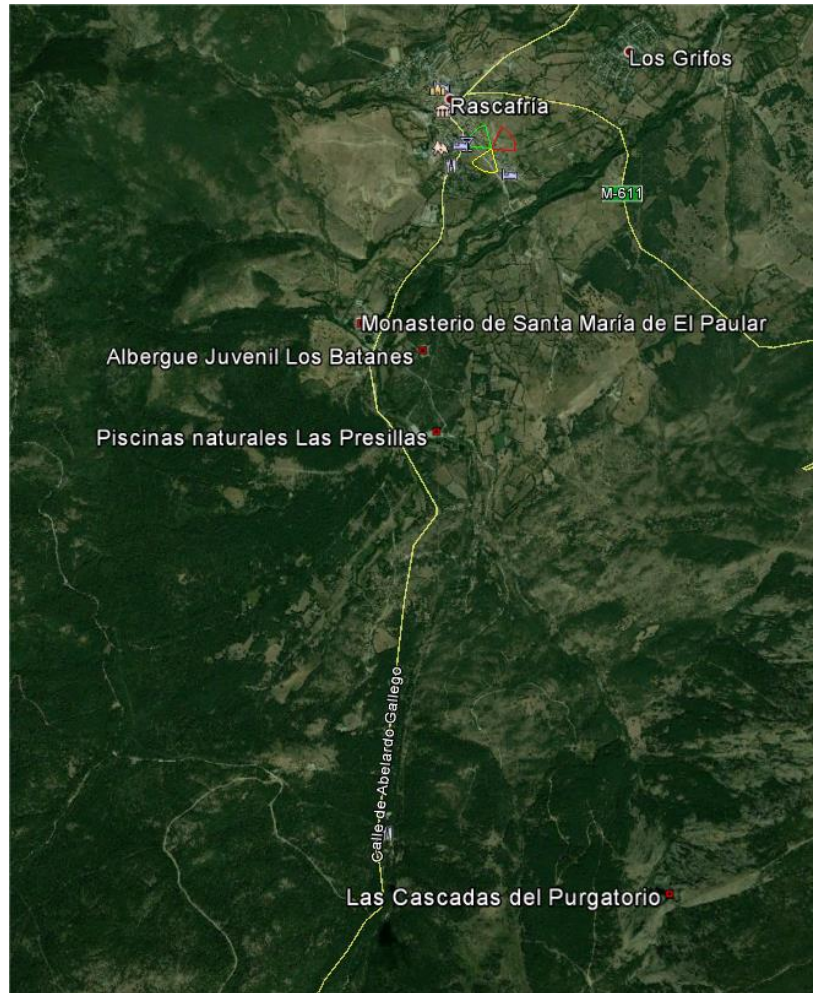


Figura 2.1. Zona de análisis con los principales lugares

### 2.3.1 COBERTURA TEÓRICA

En España, los principales operadores de telefonía móvil tienen cubierto el 99% del territorio con cobertura 2G. Para cobertura 3G el porcentaje varía considerablemente, provincias como Madrid, Toledo, Sevilla o Cádiz, rozan el 100% de cobertura 3G mientras que provincias como Ávila, Teruel o Soria la cobertura 3G no supera el 90% de la población. En la **Figura 2.2** se puede ver el detalle de la cobertura en España según la CNMC [5].



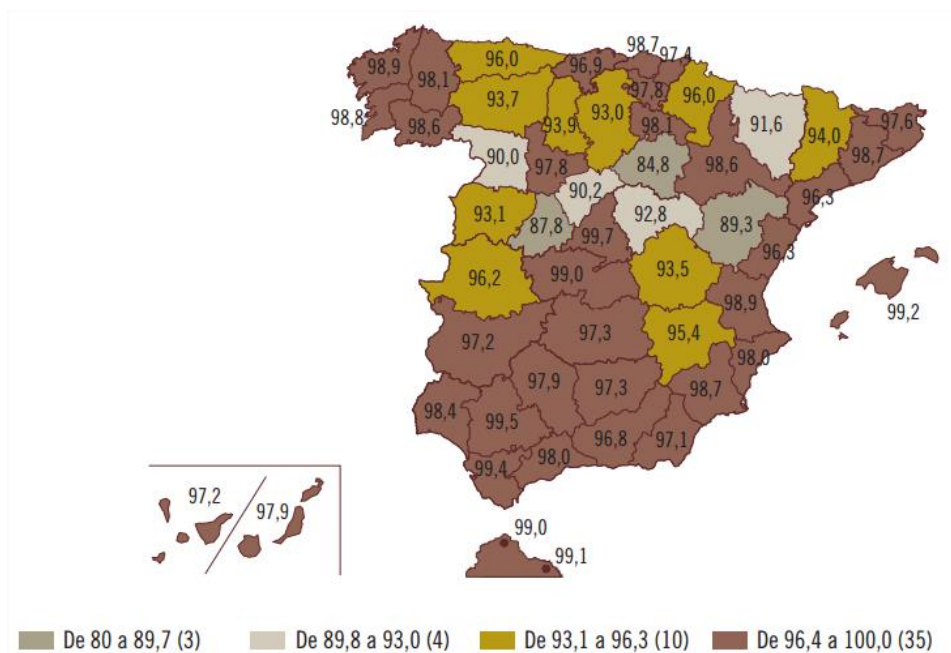


Figura 2.2. Población con acceso a redes 3G/UMTS (%)

Como se puede ver en la **Figura 2.3**, la cobertura teórica 2G es completa en la zona de estudio. En 3G, **Figura 2.4**, únicamente queda cubierta la localidad de Rascafría con buenos niveles de señal. El Monasterio de Santa María de El Pular y las zonas próximas a la localidad quedan cubiertas pero con unos bajos niveles de señal. En 4G, **Figura 2.5**, únicamente queda cubierto el núcleo urbano.



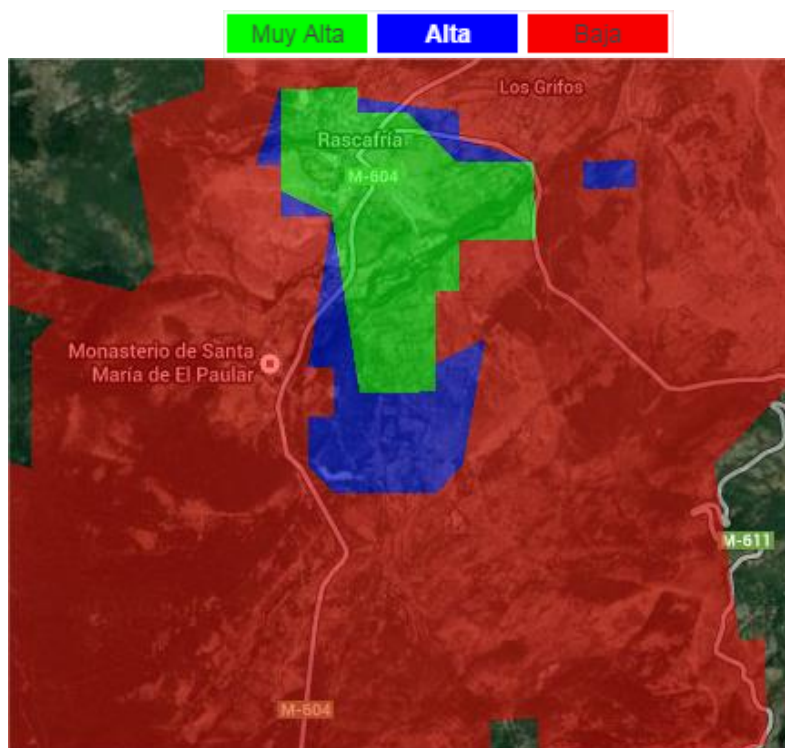


Figura 2.3. Cobertura 2G actual en la zona de estudio

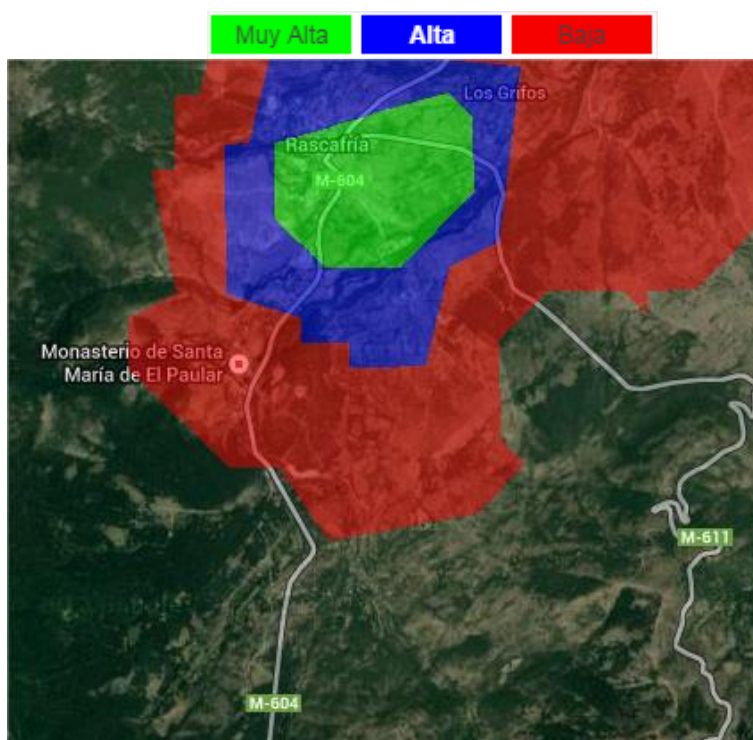


Figura 2.4. Cobertura 3G (900MHz y 2100MHz) actual en la zona de estudio

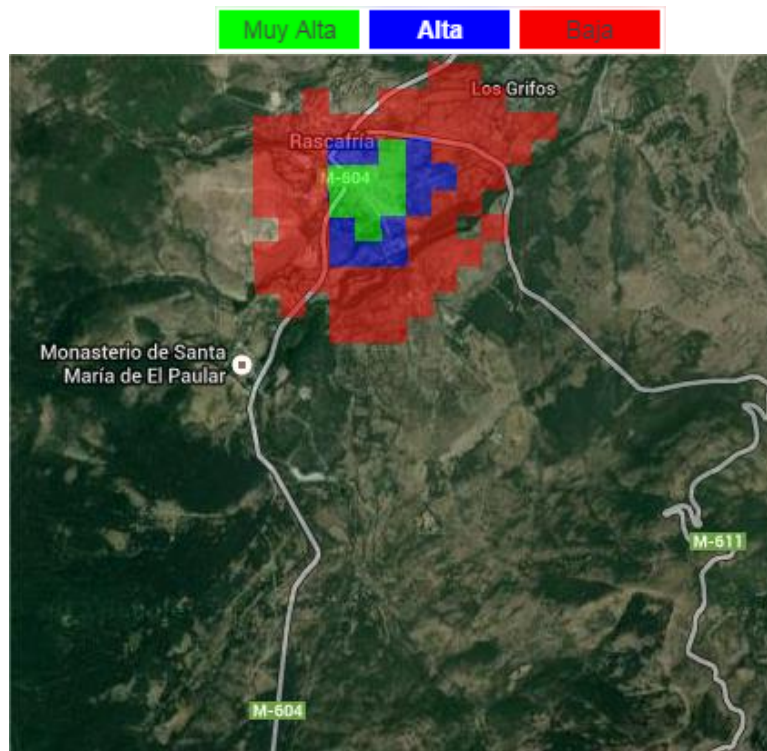


Figura 2.5. Cobertura 4G (1800MHz/2600MHz) actual en la zona de estudio

Todas estas coberturas han sido obtenidas de la web del operador nacional [6] que se utiliza para todas las medidas de este proyecto. Para la obtención de todas estas medidas el operador ha utilizado herramientas de radiopropagación y cartografía digital. El grado de precisión en este tipo de cálculos no es del 100%.

La única forma de obtener una visión real de la cobertura en una zona determinada es realizar medidas de los niveles de señal.

## 2.4 MEDIDAS DE COBERTURA

Se han realizado las medidas de cobertura en la ruta de senderismo de Las Cascadas del Purgatorio. Para ello se han realizado medidas en idle del nivel de señal recibido en un teléfono móvil.

Un terminal en estado idle no tiene una conexión establecida, la red únicamente conoce la posición del terminal a nivel de *Location Area* (LA) o *Routing Area* (RA). El terminal realiza mediciones para las posibles reselecciones de celdas y solo comunica con la red cuando realiza un cambio de LA o RA. Se ha elegido realizar las medidas en idle y no en estado conectado, ya que de

esta manera se elimina la variable de las relaciones de vecindades entre celdas, lo que podría provocar distorsiones en las medidas de nivel de señal si no existiera alguna relación de vecindad.

En una primera parte de la ruta el terminal se encontraba forzado a 3G y en el resto de la ruta en modo dual. Para la obtención de las medidas se ha utilizado un terminal Android con el programa Netmonitor [3].

Terminal	LG Nexus 4
SO	Android 4.4.4
Tecnología	Forzado 3G Dual 2G/3G
Secuencia	Idle

Figura 2.6. Características del terminal de medidas

#### 2.4.1 RESULTADOS DE LAS MEDIDAS

La ruta de la Cascada del Purgatorio es una de las rutas más transitadas del Valle de El Paular, en Rascafría. Comienza en el Puente del Perdón, frente al Monasterio de Santa María de El Paular y termina en la Cascada del Purgatorio.

La parte inicial de la ruta discurre entre robledales y pinares mixtos por amplias pistas de tierra. En el momento en que nos adentramos en la ribera del arroyo del Aguilón el sendero se estrecha y se adentra en una zona de vegetación agreste compuesta por densos bosques de pinos silvestres hasta llegar a la Cascada del Purgatorio. En el apéndice 10.2 puede verse un mapa detallado del terreno.





Rangos de señal	
	Sin señal
	(-105 , -95) dBm
	(-95 , -75) dBm
	(-75 , - ) dBm

Figura 2.7. Rangos de los niveles de señal de las medidas

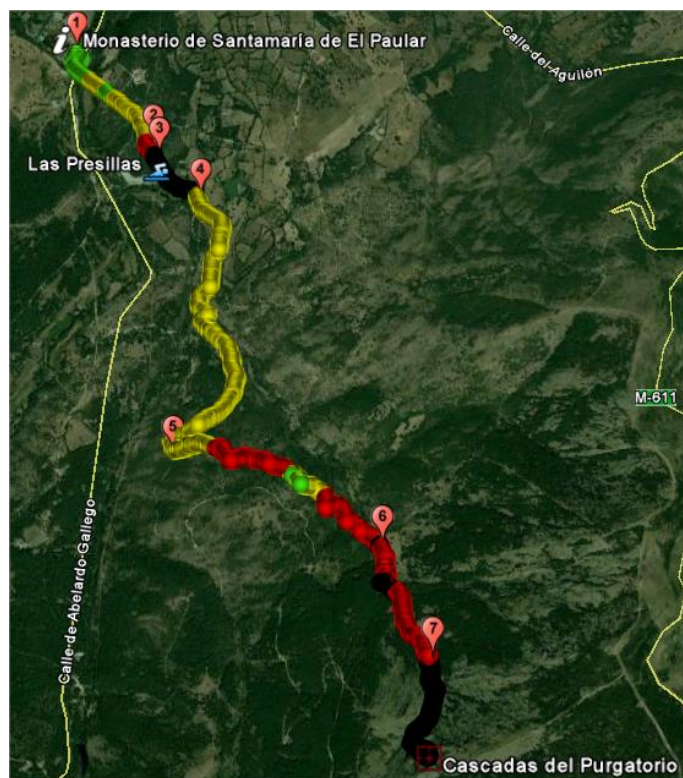


Figura 2.8. Vista general de los niveles de señal de la ruta

La primera parte de la ruta **Figura 2.8**, entre los puntos 1 y 4, es la zona más transitada por encontrarse en las inmediaciones del Monasterio de Santa María de El Paular, el Albergue Juvenil y las Piscinas naturales de Las Presillas. Es una zona en la que la ruta discurre por carretera y camino de tierra ancho y el terreno es prácticamente llano, no hay obstáculos en el terreno.

Al comienzo de la ruta se configuró el terminal forzado a 3G, de esta manera se quería conocer si en las zonas de mayor afluencia de personas se podría tener cobertura de banda ancha.

Entre los puntos 1 y 2 el nivel de señal era bueno y no se detectaron problemas. Desde el punto 2 el nivel de señal se fue degradando hasta que en el punto 3 se perdió la señal 3G. Se mantuvo el terminal forzado hasta que se pasó la zona de las piscinas naturales, por si en algún punto la señal 3G se recuperaba, pero en ningún punto se volvió a tener señal 3G. Durante toda esta primera parte existían buenos niveles de señal 2G.



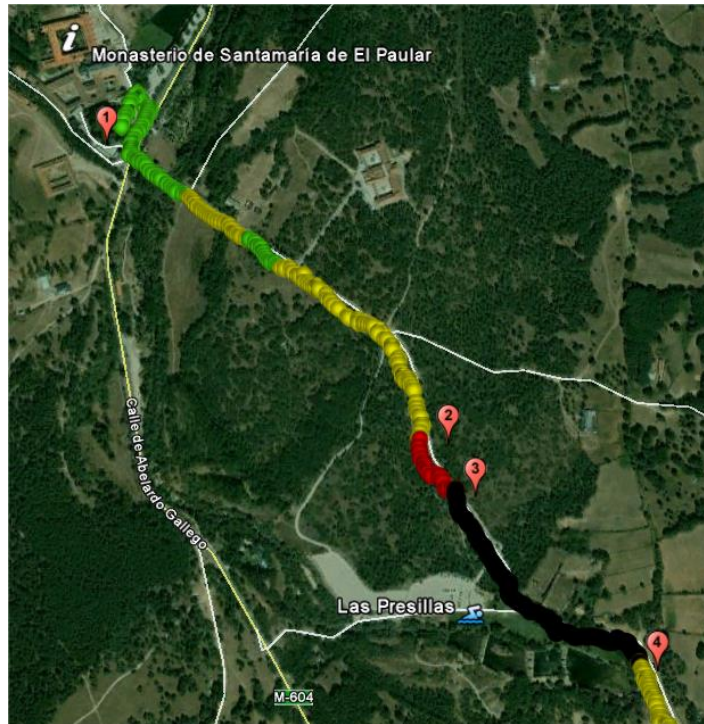


Figura 2.9. Detalle de los niveles de señal de la primer parte de la ruta

La segunda parte de la ruta **Figura 2.10**, comienza en el punto 4, donde se configura el terminal en modo dual 2G/3G. Aunque durante todo el recorrido el terminal se encuentra en 2G.

Entre el punto 4 y 5 se continúa por una pista de tierra ancha con árboles ambos lados. Los niveles de señal son aceptables, se encuentran en la mayor parte del tramo entre -85dBm y -95dBm.

Al llegar al punto 5 el camino se estrecha y se entra en una zona con una vegetación más frondosa. En este punto ya nos encontramos unos 100m por encima de la cota de la antena y a más de 4Km. Entre los punto 5 y 6 la señal comienza a degradarse, con variaciones bruscas del nivel de señal, lo que en algún momento impediría la correcta comunicación.

En el punto 6 el valle se estrecha y se termina la pista de tierra. Comienza la subida por la ribera del arroyo del Aguilón siguiendo una pequeña senda entre árboles. La primera perdida de señal ocurre al cruzar el rio, recuperando la señal unos metros más adelante. Entre el punto 6 y 7 la señal recibida es muy baja y probablemente en muchos momentos la comunicación sería imposible.

A partir del punto 7 y hasta llegar a la Cascada del Purgatorio no existe ningún tipo de señal móvil, es un valle cerrado y rodeado por zonas rocosas.

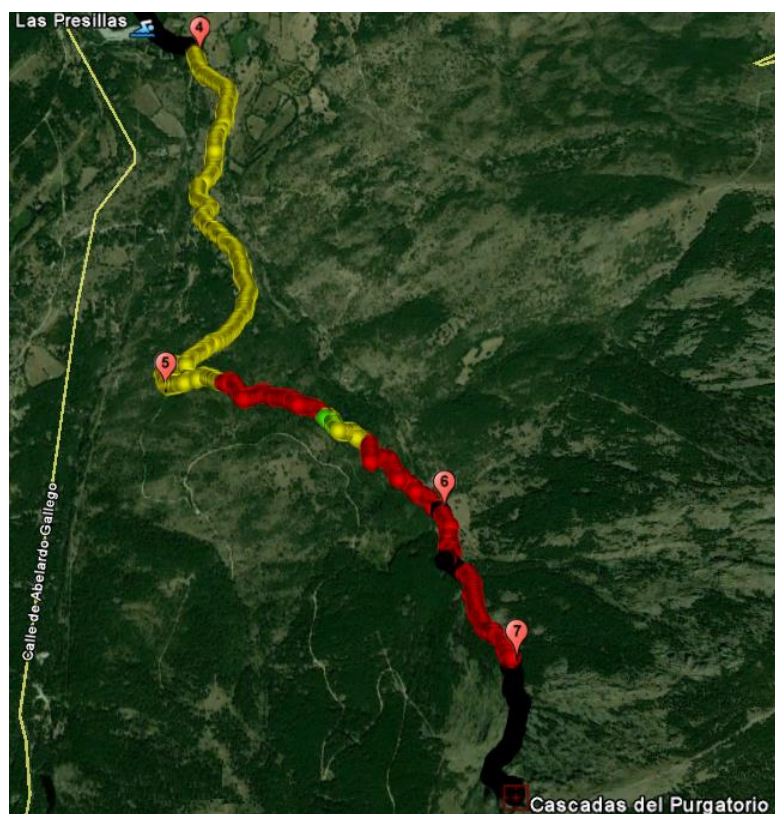


Figura 2.10. Detalle de los niveles de señal de la segunda parte de la ruta

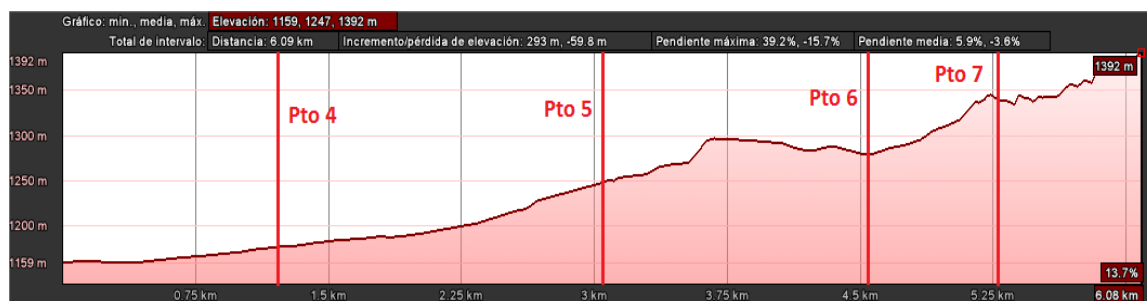


Figura 2.11. Altimetría de la ruta



Figura 2.12. Detalle de la orografía de la ruta

## 2.5 REQUISITOS QUE TENDRÍAN QUE TENER LAS SOLUCIONES

Como se ha podido ver en las medidas en una gran parte de la ruta los niveles de señal son muy malos o inexistentes.

Actualmente sería inviable económicamente dotar de cobertura una ruta de este tipo, sería necesaria una gran inversión para la instalación de nuevas estaciones base, que ninguna compañía estaría dispuesta a asumir, por el escaso tráfico de voz y datos que se produciría en la zona. Habría que buscar otras soluciones para poder tener unos niveles de cobertura aceptables en toda la ruta.

Con las tecnologías actuales encontrar una solución que no implicara un despliegue de estaciones base o repetidores sería muy complicado. GSM se encuentra en una fase tecnológica muy madura, o más bien podemos decir que está entrando en una fase de obsolescencia, por lo que introducir nuevas mejoras o cambios en los estándares no sería posible. Con UMTS ocurre algo similar, se encuentra en una fase madura, en la que apenas se introducen mejoras. Hoy en día todos los esfuerzos de innovación y mejoras se encuentran centrados en LTE y en futuras tecnologías.

Por tanto, el primer requisito que tiene que tener la solución es que se utilice la tecnología LTE, esta tecnología se encuentra en una fase de crecimiento temprana, con mucho margen de mejora y de innovación, lo que posibilitaría la

introducción de nuevas técnicas o métodos en los estándares, para poder mejorar la extensión de cobertura en lugares como los que estamos analizando en este proyecto, sin la instalación de nuevas estaciones bases.

También sería importante la elección de la banda de frecuencia a utilizar, ya que un aspecto muy importante será el alcance que tenga la señal. En España el LTE se ha licenciado en 3 bandas de frecuencia diferentes: 800MHz **Tabla 2.1**, 1800MHz **Tabla 2.2** y 2600MHz **Tabla 2.3**.

	LTE 800*			
	Frecuencias uplink (MHz)		Frecuencias downlink (MHz)	
<b>ORANGE</b>	791	801	832	842
<b>MOVISTAR</b>	801	811	842	852
<b>VODAFONE</b>	811	821	852	862

Tabla 2.1. Frecuencias LTE 800MHz

\* Pueden sufrir modificaciones.

	LTE 1800*			
	Frecuencias uplink (MHz)		Frecuencias downlink (MHz)	
<b>MOVISTAR</b>	1710.1	1730.1	1805.1	1825.1
<b>VODAFONE</b>	1730.1	1750.1	1825.1	1845.1
<b>YOIGO</b>	1750.1	1764.9	1845.1	1859.9
<b>ORANGE</b>	1764.9	1784.9	1859.9	1879.9

Tabla 2.2. Frecuencias LTE 1800MHz.

\* Las frecuencias de la banda LTE 1800 se comparten con el DCS. Cada operador elige que parte de su banda dedica a cada tecnología.

	LTE 2600			
	Frecuencias uplink (MHz)		Frecuencias downlink (MHz)	
<b>MOVISTAR</b>	2500	2520	2620	2640
<b>ORANGE</b>	2520	2540	2640	2660
<b>VODAFONE</b>	2540	2560	2660	2680
<b>OTROS</b>	2560	2570	2680	2690

Tabla 2.3. Frecuencias LTE 2600MHz

La solución deberá tener un bajo coste de implementación y mantenimiento, el objetivo es dotar zonas en las que el tráfico de voz y datos será bajo, por lo que si se realizara una importante inversión o unos altos costes de mantenimiento se tendría un retorno de la inversión muy bajo, por lo que no sería económicamente viable.



En casos de emergencia la comunicación debe poder llevarse a cabo de una forma rápida y si no se tiene cobertura, deberá existir algún método para que la comunicación se realice cuando se logre reconectar con la red de forma automática, enviando también la posición actual, mediante la utilización del GPS del terminal móvil.

## 3 SOLUCIONES DE MEJORA DE COBERTURA EN LTE

### 3.1 INTRODUCCIÓN

Todos los modelos anteriores de sistemas celulares estaban basados en la conmutación de circuitos. LTE desde un principio se ha diseñado como un modelo únicamente de conmutación de paquetes. Todas las conexiones entre UE y PDN se llevarán a cabo mediante IP.

La red de acceso en LTE se denomina E-UTRAN [7], por ser una evolución de las anteriores redes UTRAN en UMTS. La evolución de los aspectos no radio se denomina SAE, que incluye el EPC. La unión de E-UTRAN y SAE se denomina Evolved Packet System (EPS).

EPS utiliza el concepto de portadores para enrutar el tráfico IP del PDN al UE. Una portadora es un flujo de paquetes IP con una calidad de servicio (QoS) definida entre el PDN o Gateway y el UE. La E-UTRAN junto con el EPC se encargan de crear y liberar las portadoras requeridas por las aplicaciones.

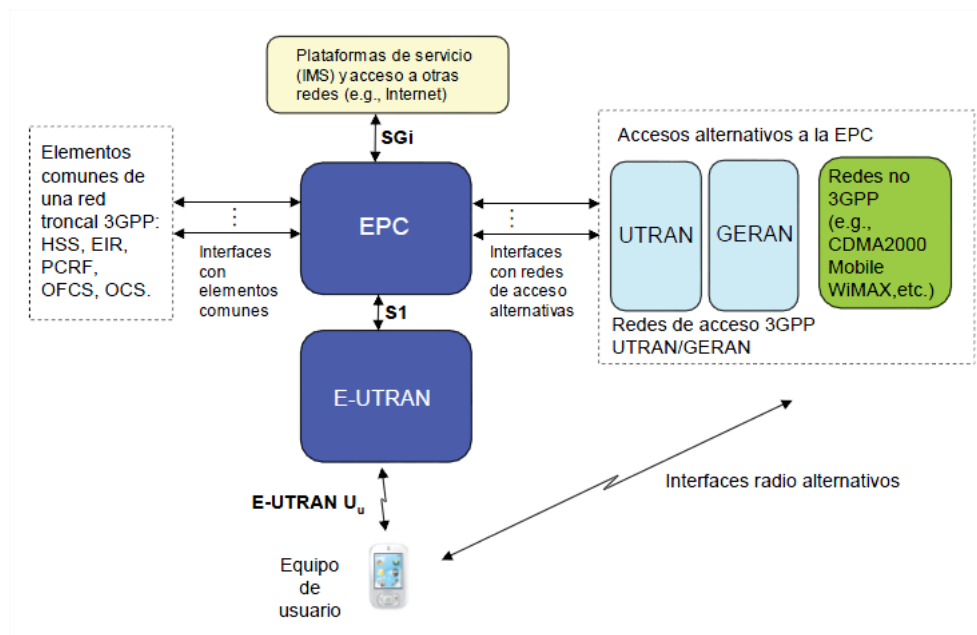


Figura 3.1. Arquitectura del sistema LTE [8]

### 3.2 ARQUITECTURA GENERAL

Los componentes fundamentales del sistema LTE son [7], por un lado, la nueva red de acceso E-UTRAN y el nuevo dominio de paquetes EPC de la red troncal, y por otro, la evolución del subsistema IMS concebido inicialmente en el contexto de los sistemas UMTS. Los diferentes componentes han sido diseñados para soportar todo tipo de servicios de telecomunicación mediante mecanismos de conmutación de paquetes, por lo que no resulta necesario disponer de un componente adicional para la provisión de servicios en modo circuito (en el sistema LTE estos servicios también se soportan mediante conmutación de paquetes). En este sentido, EPC constituye una versión evolucionada del sistema GPRS.

La red de acceso E-UTRAN y la red troncal EPC proporcionan de forma conjunta servicios de transferencia de paquetes IP entre los equipos de usuario y redes de paquetes externas tales como plataformas IMS u otras redes de telecomunicaciones. Formalmente, el servicio de transferencia de paquetes IP ofrecido por la red LTE entre el equipo de usuario y una red externa se denomina servicio portador EPS (EPS Bearer Service). Asimismo, la parte del servicio de transferencia de paquetes que proporciona la red de acceso E-UTRAN se denomina E-UTRAN Radio Access Bearer (ERAB).

Otra característica importante del sistema LTE es que contempla el acceso a sus servicios a través de UTRAN y GERAN, así como mediante la utilización de otras redes de acceso que no pertenecen a la familia 3GPP (CDMA2000, WiMAX, redes 802.11, etc.).

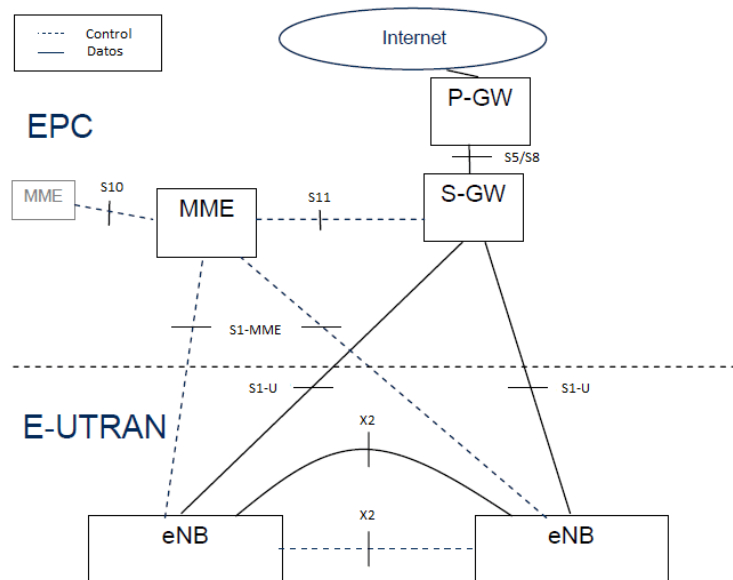


Figura 3.2. Componentes e interfaces fundamentales del sistema LTE [9]

### 3.3 EL CORE NETWORK

El Core Network [10] se encarga del control global del UE y del establecimiento de los portadores. Los principales elementos son:

- PDN Gateway (P-GW)
- Serving Gateway (S-GW)
- Mobility Management Entity (MME)

En el EPC también se incluye otros elementos lógicos y funcionalidades, tales como el Home Subscriber Server (HSS) and The Policy Control and Charging Rules Function (PCRF).

A continuación se puede ver en más detalle cada uno de los elementos principales del Core Network [11].

- **P-GW:** El PDN Gateway es el encargado de la asignación de direcciones IP para cada UE, así como de la aplicación de la QoS de acuerdo a las reglas de la PCRF. Se encarga del filtrado de los paquetes de los usuarios en el enlace descendente diferenciando las diferentes calidades de servicio. Esto se realiza basándose en plantillas de flujo de tráfico (TFT). El P-GW se encarga de garantizar la velocidad de bits de los portadores (GBR). Por último se encarga de la interconexión con otras redes no 3GPP, como son CDMA2000 y WiMAX.
- **S-GW:** Todos los paquetes IP de los usuarios se transfieren a través del S-GW, que se encarga del control de la movilidad local para los portadores de datos cuando el UE se mueve entre eNodeB. También conserva la información acerca de los portadores cuando el UE está en el estado de reposo (Idle). Posee buffers temporales de datos, en el enlace descendente, para restablecer los portadores entre el UE y el MME. Además, la S-GW realiza funciones administrativas, como la recopilación de información, por ejemplo, el volumen de datos enviados o recibidos por el usuario y la interceptación legal. También sirve como interconexión con otras redes 3GPP como GPRS o UMTS.
- **MME:** Mobility Management Entity (MME) es el elemento de control que procesa la señalización entre la UE y el CN. Los protocolos que funcionan entre el UE y el CN se conocen como Non Access Stratum (NAS). Las principales funciones soportadas por el MME se pueden clasificar como:

- Funciones relacionadas con la gestión portadora: Esto incluye el establecimiento, mantenimiento y liberación de los portadores y es manejado por la capa de gestión de sesiones del protocolo NAS.
- Funciones relacionadas con la gestión de la conexión: Esto incluye el establecimiento de la conexión y seguridad entre la red y el UE y es manejado por la capa de conexión o la capa de gestión de la movilidad del protocolo NAS.
- **HSS:** el Home Subscriber Server es la base de datos principal del sistema 3GPP que almacena la información de los usuarios de la red. Se puede considerar una evolución del HLR (Home Location Register) de GSM. Entre la información almacenada en el HSS podemos destacar:
  - Identificadores universales del usuario, como el IMSI (International Mobile Subscriber Identity),
  - Identificadores de servicio (Mobile Station ISDN, MSISDN)
  - Información de seguridad y cifrado
  - Información de localización del usuario en la red (identificador de la entidad de control, como el MME, que proporciona el plano de control hacia un determinado UE).
  - Información necesaria para la provisión de los servicios de acuerdo con las condiciones establecidas en el contrato de suscripción (parámetros de calidad de servicio del servicio portador por defecto).
- **PCRF:** se encarga del control de los servicios portadores que ofrece la red LTE, como la activación y determinación de los parámetros de QoS asociados a cada portadora. También realizar el control de los mecanismos de tarificación, medición del volumen de datos transferido, duración de las llamadas etc.

### 3.4 LA RED DE ACCESO

La red de acceso en LTE, llamada E-UTRAN [12], está compuesta por una única entidad, el evolved NodoB (eNodoB). No existe un controlador centralizado, como ocurre en GSM/UMTS con la BSC/RNC, se evoluciona a una estructura plana

en la que el eNodeB ejecuta todos los protocolos de la interfaz radio, tanto del plano de usuario como del plano de control y lleva a cabo toda la gestión de la interfaz radio.

Los eNodeBs pueden estar interconectados entre sí por medio del interfaz X2 y al EPC por medio del interfaz S1. Este interfaz está compuesto por dos partes, el interfaz S1-MME que se utiliza para la señalización y une el eNodeB y el MME, y el interfaz S1-U por donde se transmiten los datos de usuario y que conecta el eNodeB con el S-GW. La conexión entre el eNodeB y los equipos de usuario se conoce como interfaz radio o Uu.

#### 3.4.1 EVOLVED NODEB

El eNodeB realiza la transmisión de los paquetes IP hacia los equipos de usuario [13], junto con los mensajes de señalización necesarios para controlar la operación de la interfaz radio. El servicio de transferencia de paquetes IP entre un eNodeB y un UE se denomina servicio portador radio (Radio Bearer, RB). El eNodeB mantiene un contexto de cada uno de los UE que están conectados. De cada usuario se almacena la información necesaria para mantener los servicios de E-UTRAN activos (información sobre el estado del equipo de usuario, servicios portadores activos, información de seguridad, capacidades del terminal, etc.).

El eNodeB alberga funciones de control de admisión de los servicios portadores radio, control de movilidad, asignación dinámica de los recursos radio tanto en el enlace ascendente como descendente (funciones de scheduling), control de interferencias entre celdas, control de la realización y del envío de medidas desde los equipos de usuario que puedan ser útiles en la gestión de recursos, etc.

Un eNodeB puede enviar y recibir paquetes IP de los usuarios, a los que sirve a través de diferentes pasarelas S-GW de la red troncal EPC. Ello conlleva que el eNodeB albergue funciones de encaminamiento del tráfico de los usuarios hacia la pasarela de red S-GW correspondiente.

#### 3.4.2 INTERFAZ RADIO

La interfaz radio soporta básicamente tres tipos de mecanismos de transferencia de la información en el canal radio **Figura 3.3:** difusión de señalización de control, envío de paquetes IP y transferencia de señalización de control dedicada entre un UE y el eNodeB.

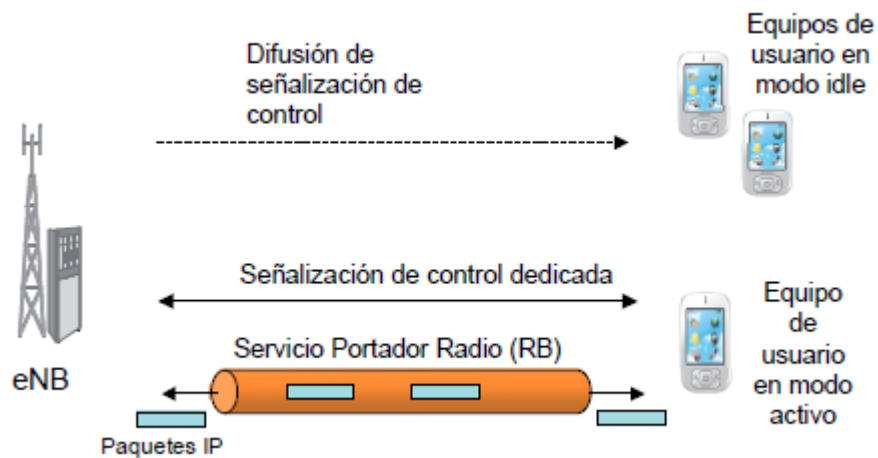


Figura 3.3. Mecanismos de transferencia de la información en el canal radio [8]

- **Difusión de señalización de control.** La información enviada permite a los equipos de usuario detectar la presencia del eNodoB y conocer sus parámetros básicos de operación así como la identidad de los operadores de red a los que puede accederse a través del eNodoB.
- **Transferencia de paquetes IP** de los usuarios a través del canal radio. Es importante destacar que los servicios portadores radio de E-UTRAN han sido diseñados específicamente para soportar tráfico IP y no permiten la transferencia de otros protocolos. Por ello, de cara a la optimización del envío de tráfico IP a través de la interfaz radio, los servicios portadores albergan funciones como la compresión de cabeceras de los paquetes IP que permiten reducir el número de bytes enviados por la interfaz radio.
- **Transferencia de señalización de control** dedicada entre el eNodoB y un equipo de usuario. El establecimiento de una conexión de control dedicada resulta imprescindible para poder gestionar el uso de los servicios portadores radio así como para realizar cualquier gestión de señalización con la red troncal. La conexión de control se soporta mediante el protocolo Radio Resource Control (RRC). A través de dicho protocolo se gestiona el establecimiento, modificación y liberación de los servicios portadores radio entre el eNodoB y el equipo de usuario, otros mecanismos claves para la gestión eficiente de los recursos radio, de los que destaca el mecanismo de handover, que permite que un equipo de usuario cambie de celda manteniendo

activos tanto la conexión de control como los posibles servicios portadores radio que esté utilizando. Los terminales que mantienen una conexión de control con E-UTRAN se dice que se encuentran en modo conectado o activo, en contraposición al denominado modo idle en que el terminal no tiene una conexión RRC y básicamente se encuentra monitorizando la información de control difundida por la red.

Respecto al envío de paquetes de usuario, cada servicio portador tiene asociado un perfil de QoS que debe satisfacerse mediante la correcta configuración de los protocolos radio así como la adecuada operación de los mecanismos de gestión de recursos radio.

#### 3.4.2.1 PROTOCOLOS EN LA INTERFAZ RADIO

El envío de paquetes IP entre el eNodeB y un equipo de usuario a través de la interfaz radio se sustenta en una torre de protocolos formada por una capa de enlace o capa de nivel 2 y una capa física. La capa de enlace se desglosa a su vez en tres subcapas: Packet Data Convergence Protocol (PDCP), Radio Link Control (RLC) y Medium Access Control (MAC). Cada capa o subcapa de la torre de protocolos se ocupa de un conjunto de funciones concreto y define el formato de los paquetes de datos que se intercambian entre entidades remotas **Figura 3.4**. Las principales características de las diferentes capas/subcapas son:

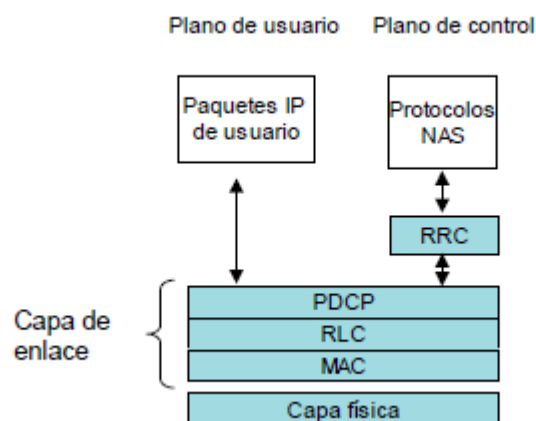


Figura 3.4. Protocolos de la interfaz radio de E-UTRAN [8]



- **Packet Data Convergence Protocol (PDCP).** [14] Constituye la capa superior de la torre de protocolos encargada de proporcionar el punto de acceso al servicio portador radio (Radio Bearer, RB). Es decir, los paquetes IP del tráfico de usuario se entregan y se reciben a través del servicio de transferencia proporcionado por la capa PDCP. Las funciones principales de esta capa son la compresión de cabeceras de los paquetes IP y el cifrado de la información para garantizar su confidencialidad e integridad. La cabecera añadida por la capa PDCP básicamente contiene un número de secuencia que identifica al paquete IP enviado y permite realizar una entrega ordenada de los paquetes IP en el extremo receptor así como detectar posibles duplicados de los paquetes IP (ocasionados, por ejemplo, en un proceso de handover). Cada servicio portador radio tiene una entidad PDCP asociada.
- **Radio Link Control (RLC).** [15] La capa RLC permite enviar de forma fiable los paquetes PDCP entre el eNodoB y equipo de usuario. Para ello, la capa RLC soporta funciones de corrección de errores mediante mecanismos ARQ, concatenación, segmentación y re-ensamblado, entrega ordenada de paquetes PDCP a capas superiores (excepto durante el mecanismo de handover), detección de duplicados y detección y recuperación de errores en el protocolo. Cada servicio portador radio tiene una entidad RLC asociada.
- **Medium Access Control (MAC).** [16] Es la capa encargada de controlar el acceso al canal radio. Para ello, la capa MAC soporta funciones de scheduling dinámico entre equipos de usuario atendiendo a prioridades, multiplexa los paquetes RLC de diferentes servicios portadores radio en los canales de transporte ofrecidos por la capa física, un canal de transporte puede ser compartido por varios servicios portadores de uno o varios equipos de usuario, y realiza un control de errores mediante HARQ. Los servicios de transferencia que la capa MAC ofrece a la capa RLC se denominan canales lógicos. Existe una única entidad MAC por celda.
- **Capa física.** Es la capa encargada de realizar la transmisión a través del canal radio. Alberga funciones de codificación de canal,

modulación, procesamiento asociado a las técnicas de múltiples antenas de transmisión y recepción, y mapeo de la señal a los recursos físicos frecuencia-tiempo apropiados. En el enlace ascendente, la capa física se basa en un esquema SC-FDMA. En el enlace descendente, el esquema de transmisión es OFDMA. Los servicios de transferencia que la capa física ofrece a la capa MAC se denominan canales de transporte. Existe una única entidad de capa física por celda.

Respecto al plano de control entre el equipo de usuario y la red, éste se soporta sobre la misma capa de enlace (protocolos PDCP, RLC, MAC) y la misma capa física utilizadas en el plano de usuario. Los protocolos de nivel de red específicos de este plano son:

- **Radio Resource Control (RRC).** [17] Esta capa permite establecer una conexión de control entre el eNodeB y un equipo de usuario a través de la cual se llevan a cabo un número importante de funciones relacionadas con la gestión de la operativa de la interfaz radio. Entre dichas funciones de la capa RRC destacan los mecanismos de gestión de los servicios portadores radio (p.ej., señalización para el establecimiento, liberación y modificación de los portadores radio), el soporte de funciones de movilidad, la difusión de parámetros de sistema y funciones de aviso de los terminales que no disponen de una conexión RRC establecida. El servicio de transferencia que ofrece la capa PDCP para el envío de los mensajes de señalización del protocolo RRC se denomina servicio portador de señalización SRB.
- **Señalización de los protocolos NAS.** Los protocolos NAS se extienden entre la entidad de red MME en la red troncal y el equipo de usuario. Los mensajes de estos protocolos se transportan de forma transparente en la interfaz radio encapsulados dentro de la parte de datos de los mensajes RRC. Las principales funciones de los protocolos NAS son: autenticación, autorización, gestión de movilidad de los terminales que no tienen una conexión RRC establecida y gestión de los servicios portadores de la red EPS.

#### 3.4.2.2 CANALES DE LA INTERFAZ RADIO

Cada canal de transporte se caracteriza por el procesamiento de los canales físicos correspondientes. La capa física tiene que ser capaz de proporcionar la asignación dinámica de recursos tanto para la variación del tipo de datos como para la división de recursos entre los diferentes usuarios.

El canal físico utilizado para enviar la información de usuario en el enlace ascendente es el PUSCH. Ese canal sólo se activa cuando este tiene algo que transmitir en el enlace ascendente.

En el caso del canal lógico de radiodifusión (BCCH), y dependiendo del tipo de información a transmitir, dicho canal puede transmitirse utilizando bien el canal de transporte de radiodifusión (BCH), bien el canal compartido (DL-SCH). También se utiliza no sólo para transportar datos de usuario (DTCH) sino también señalización común (CCCH) y dedicada (DCCH). Esto es así ya que a diferencia de los anteriores sistemas de telefonía móvil, el sistema LTE no define canales físicos ni de transporte dedicados. Solo cuando el usuario tiene datos o señalización que transmitir o recibir se activa el canal compartido y por lo tanto no se desperdician recursos manteniendo activos canales dedicados que no siempre se utilizan.

**Canales lógicos** [15]: indican el tipo o naturaleza de la información que se intercambia

- De control
  - BCCH (Broadcast Control Channel, DL): información general de configuración de la red para todos los terminales.
  - PCCH (Paging Control Channel, DL): información de aviso (paging) a terminales, aviso a UE con ubicación no conocida
  - CCCH (Common Control Channel, DL y UL): otros tipos de información de control a un usuario cuando no hay conexión activa.
  - DCCH (Dedicated Control Channel, DL y UL): información de control dedicada a un usuario (potencia, handover...)
  - MCCH (Multicast Control Channel, DL): señalización necesaria para la recepción multicast (MTCH).
- De tráfico
  - DTCH (Dedicated Traffic Channel, DL y UL): transmisión de información de usuario dedicada.
  - MTCH (Multicast Traffic Channel, DL): transmisión de información multicast, para servicios de Multimedia Broadcast Multicast Service (MBMS).

**Canales de transporte** [16]: indican como se estructura la información según diferentes formatos de transporte, en los llamados bloques de transporte (TrBk: Transport blocks). El contenido de cada TrBk es el conjunto de bits recogidos en un intervalo de transporte TTI (Transport Time Interval).

- Comunes o compartidos
  - BCH (Broadcast Channel, DL): sustenta el BCCH. Formato fijo. Debe difundirse en toda la celda
  - PCH (Paging Channel, DL): sustenta el PCCH. Proporciona recepción discontinua. Debe difundirse en toda la celda
  - RACH (Random Access Channel, UL): canal de acceso aleatorio. Para acceso inicial UE a la red. Riesgo de colisión, control de contienda.
  - DL-SCH (Downlink Shared Channel, DL): canal principal para el enlace descendente, compartido por varios canales lógicos. Soporta HARQ, planificación (scheduling) en tiempo y frecuencia. Multiplexación espacial (MIMO), Adaptación dinámica de tasa y configuración de haces de antena
  - UL-SCH (Downlink Shared Channel, UL): canal principal para el enlace ascendente, compartido por varios canales lógicos. Se utiliza para datos y control. Soporta HARQ y adaptación dinámica del enlace. Asignación semiestática de recursos. Posibilidad de configuración de haces de antena.
  - MCH (Multicast Channel, DL): sustenta el MTCH y el MCCH. Debe difundirse en toda la celda

**Canales físicos** [18]: establecen como se transmiten los bits de transporte en las subportadoras OFDM, con arreglo a una organización temporal articulada en tramas, subtramas e intervalos

- Asociados a canales de transporte
  - PDSCH (Physical Downlink Shared Channel, DL): para transmisiones unicast y paging. Sustenta el DL-SCH y el PCH
  - PBCH (Physical Broadcast Channel, DL): información de acceso a la red. Sustenta el BCH
  - PMCH (Physical Random Access Channel, DL): información de la red para multicast (MBMS). Sustenta el MCH
  - PUSCH (Physical Uplink Shared Channel, UL): para transmisiones unicast. Sustenta el UL-SCH. Equivalente en UL al PDSCH.
  - PRACH (Physical Random Access Channel, UL): para el acceso aleatorio. Sustenta el RACH
- No asociados a canales de transporte

- PDCCH (Physical Downlink Control Channel, DL): decisiones de planificación de usuarios en DL y UL, e información relacionada. Acuses de recibo (ACK/NACK)
- PHICH (Physical Hybrid-ARQ Indicator Channel, DL): contiene los ACK/NACK de HARQ en sentido descendente.
- PCFICH (Physical Control Format Indicator Channel, DL): información de señalización necesaria para decodificar el PDCCH. Indica el número de símbolos de PDCCH por subtrama.
- PUCCH (Physical Uplink Control Channel, UL): envía los ACK/NACK de HARQ ascendentes, informes de estado del canal radio y petición de recursos ascendentes.

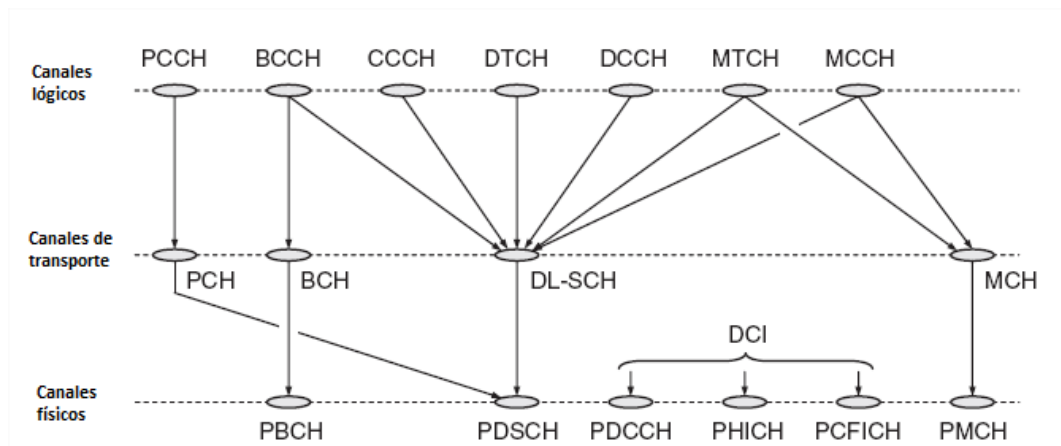


Figura 3.5. Relación entre los canales lógicos, de transporte y físicos en el enlace descendente. [19]

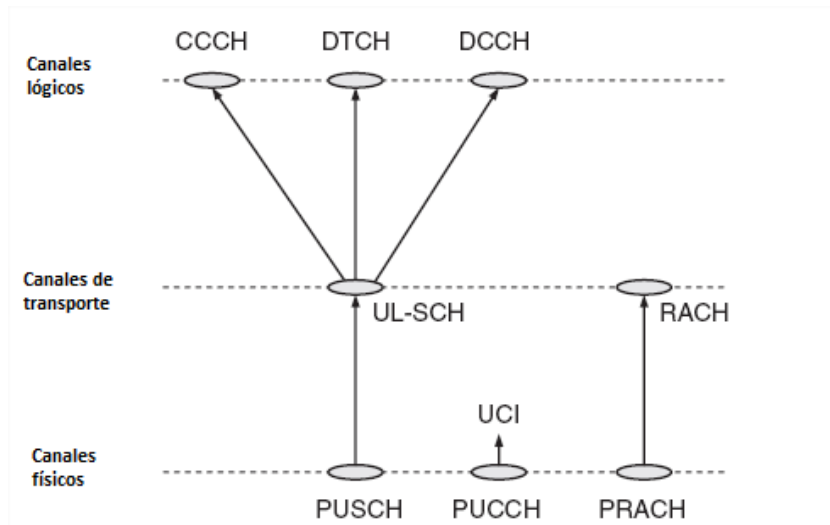


Figura 3.6.Relación entre los canales lógicos, de transporte y físicos en el enlace ascendente.  
[19]

### 3.4.2.3 ACCESO INICIAL LTE

El acceso inicial [8] [20] [21] es el proceso que transcurre desde el encendido del terminal móvil o la primera conexión del terminal a la red y hasta que se transmiten los primeros datos de usuario. Este proceso está compuesto de tres fases **Figura 3.7**: La búsqueda de celda y selección de celda, la recepción de información del sistema y el proceso de acceso aleatorio.

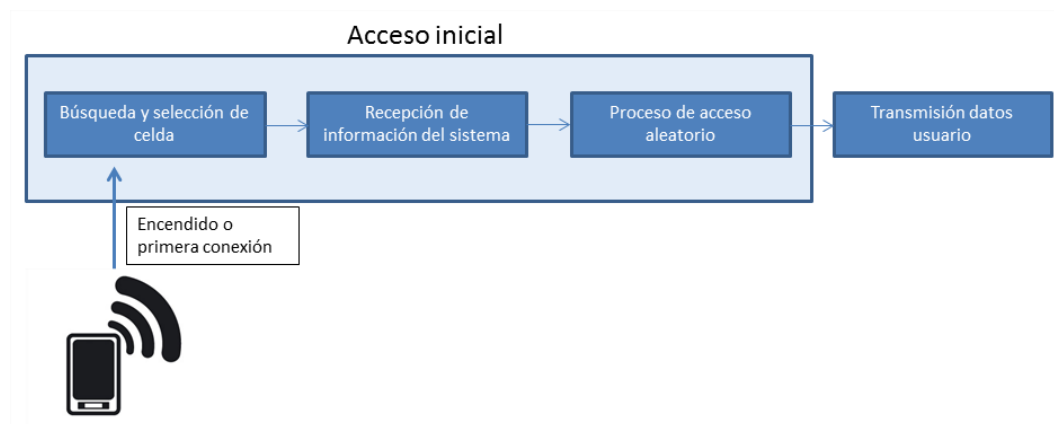


Figura 3.7. Acceso inicial

- Búsqueda de celda y selección de celda

El primer proceso que el UE debe realizar, una vez encendido, es buscar una celda a la que pueda conectarse, para ello necesita:

- Sincronizarse en tiempo y frecuencia a nivel físico.
- Sincronizarse temporalmente a nivel de trama y subtrama.
- Conocer la identidad de la celda.

Para facilitar los procesos de sincronización temporal (fundamentalmente a nivel de trama y subtrama) se utiliza la señal de sincronización (SCH). Esta señal se desglosa en:

- PSS (Primary synchronization signal) o P-SCH (Primary SCH) que permite la sincronización temporal a nivel de subtrama, mediante procedimientos de correlación entre la señal recibida y una secuencia de referencia almacenada en el receptor.
- SSS (Secondary synchronization signal) o S-SCH (Secondary SCH) que posibilita la sincronización temporal a nivel de trama, utilizando la misma metodología de correlación temporal.

Lo primero que el móvil realiza es detectar la posición temporal de la señal PSS. De esta señal obtiene el código primario, con un valor entre 0 y 2, que indica el cell ID dentro del Cell ID group y puede conocer los límites a nivel de ranura temporal. Con esta señal también corrige los offsets de frecuencia y frecuencia central y adquiere el sincronismo a nivel de símbolo.

La segunda señal, SSS, lleva el código secundario, con un valor entre 0 y 167. Este valor indica el Cell ID group de los 168 posibles.

Cell ID (PSS)	0 1 2	0 1 2	...	0 1 2
Cell ID group (SSS)	0	1	...	167

Figura 3.8 Grupos de PCIs

Mediante la combinación de estas dos señales se obtienen 504 Cell ID físicos, conocido como PCI (168 Cell ID groups x 3 Cell ID). El UE calcula el Cell ID físico mediante la siguiente fórmula:

$$\text{PCI} = 3 \times \text{Cell ID group} + \text{Cell ID}$$

Una vez obtenido el PCI el UE procede a la decodificación del canal de broadcast PBCH y comienza la recepción de información del sistema.

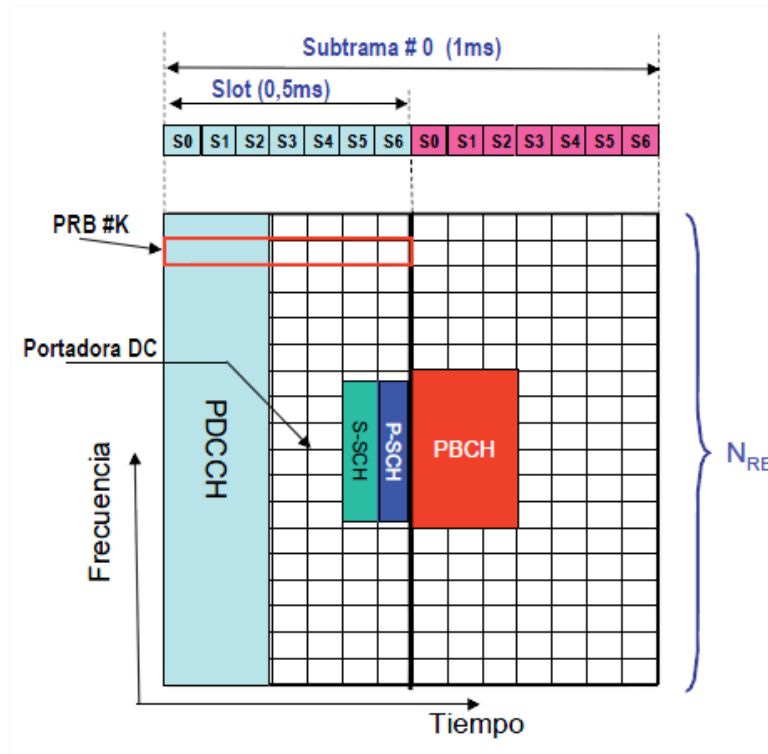


Figura 3.9. Ubicación en la estructura frecuencia-tiempo de los canales comunes de control y señales de referencia para el enlace descendente [8].

- Recepción de información del sistema

Una vez que el UE posee la información básica para poder sincronizarse y conocer la identidad de la celda, es necesario obtener información de la red, como el identificador de red (PLMN ID), el identificador de área, el identificador de la celda y las capacidades de la red de acceso y Core. La red transmite esta información para ayudar a los UEs en su proceso de selección.

El terminal móvil recibe, a través de PBCH, el denominado Master Information Block (MIB), que básicamente contiene información sobre la canalización disponible (4 bits), información sobre la configuración del canal PHICH (3 bits) y 7 bits para el número de trama (System Frame Number-SFN).

El resto de información sobre las características e identificación del sistema se obtienen a partir de los denominados System Information Blocks (SIBs). Se transmite en el PDSCH, a través de los mensajes RRC. El System Information Block más importante es SIB1 que incluye información sobre el operador de la



celda, identidad de la celda, código del área de localización, nivel de recepción mínimo requerido, etc. En el apéndice 9.1. puede encontrarse la información más detallada.

- Proceso de acceso aleatorio.

Una vez que el UE ya ha obtenido los datos de la celda en la que se encuentra y de la red, puede comenzar la transmisión de los datos de usuario. Previamente es necesario un proceso de acceso aleatorio, ya que puede que existan otros terminales que también necesiten transmitir información.

Se entiende por acceso aleatorio al procedimiento mediante el cual un terminal móvil se conecta a un determinado eNodeB. Este procedimiento se ejecuta por diversas razones:

- Al acceder el terminal móvil a la red.
- Cuando el terminal móvil realiza un procedimiento de handover, es decir cuando a lo largo de una llamada, cambia de eNodeB
- Cuando el terminal móvil realiza procedimientos de reelección de celda
- Como resultado de una llamada entrante, etc.

En el sistema LTE se definen dos tipos distintos de procedimientos de acceso:

- **Acceso basado en contienda**, que aplica de forma general, es decir tanto a los procesos de acceso general, transferencia de llamada (handover), transferencia de información en UL para establecer los mecanismos de scheduling, cuando no están disponibles canales del tipo PUCCH o bien cuando hay datos a transmitir en el enlace ascendente o descendente y el terminal móvil ha perdido la sincronización.
- **Acceso regulado** (no basado en contienda), que sólo aplica en los procedimientos de handover.

La diferencia entre uno y otro radica que en el segundo caso no hay posibilidad de colisión de la secuencia preámbulo.

Para permitir que dos o más UEs puedan utilizar el canal RACH, se han diseñado 64 configuraciones diferentes de RACH que los UE pueden utilizar. La configuración a utilizar para transmitir el preámbulo se determina en las capas superiores y es aleatorio, para minimizar las posibilidades de colisión.

Cuando el UE ha obtenido información del sistema, tiene que solicitar una conexión RRC. Como no tiene recursos dedicados, el UE pide la conexión usando el

procedimiento de acceso aleatorio (Random Access Procedure) utilizando recursos comunes de enlace ascendente [22].

- Al finalizar el procedimiento existe una conexión RRC entre el eNodeB y el UE.
- El eNodeB y el UE son capaces de intercambiar datos mediante los recursos radio dedicado.

A continuación se muestra en detalle el procedimiento acceso basado en contienda:

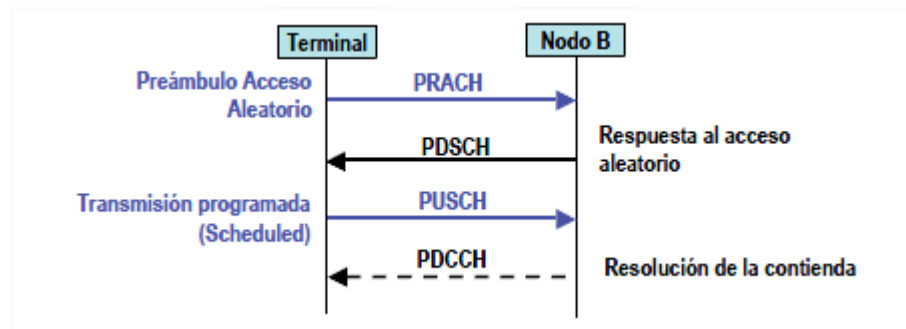


Figura 3.10. Acceso basado en contienda

1. En primer lugar se envía un preámbulo de acceso PRACH a través del canal PRACH/RACH (El UE conoce la localización del RACH en el slot mediante el canal BCH DL). La secuencia preámbulo (PRACH) se elige, de forma aleatoria, entre un grupo de hasta 64 posibles secuencias.  
El nivel de potencia con que el móvil envía este preámbulo se determina a partir de una estimación inicial de las pérdidas de propagación del enlace, utilizando para ello las señales piloto transmitidas en el enlace descendente.  
Si no hay respuesta por parte del eNB al envío del preámbulo PRACH, al cabo de un cierto tiempo el terminal móvil repite la transmisión aumentando el nivel de potencia transmitida.  
Se asocia a un RA-RNTI [23] usado por el UE para identificar la transmisión DL-SCH destinada al él, dentro del canal.
2. La respuesta a la petición de acceso aleatorio contiene el identificador aleatorio enviado por el UE (RA-RNTI), el identificador temporal del UE dentro de la celda, C-RNTI, que será usado para las asignaciones de ancho de banda, la asignación inicial de ancho de banda y el timing advance.

El timing advance se utiliza para compensar el retardo. El canal BCH tiene sincronización de trama y slot, pero no proporciona el retardo de ida y vuelta en el UL. El UE debe saber cuánto tiempo debe adelantar o retrasar la transmisión en el UL para compensar el retardo del viaje, para que la transmisión llegue en el slot correspondiente al UE.

3. El terminal móvil informa al eNB, mediante un paquete PUSCH sujeto a mecanismos de retransmisión híbrida (HARQ), sobre su identidad, mediante el C-RNTI, y puede solicitar una actualización del área de seguimiento (Tracking Area) o solicitar el establecimiento de una conexión a nivel RRC (RRC Connection Request.). Para ello utiliza el canal de transporte UL-SCH asignado por el Nodo B
4. En el caso de que dos o más terminales móviles hubieran utilizado la misma secuencia preámbulo para el bloque de acceso en el paso 1, y en tanto que el eNB no ha diferenciado entre ellos y ha mandado un único mensaje de respuesta, todos estos terminales móviles entenderían que tienen recursos reservados para transmitir (recursos que serían los mismos) y por lo tanto se produciría una colisión entre los mensajes enviados por dichos terminales móviles. En esta situación pueden darse dos supuestos:
  - a. El eNB no es capaz de detectar ninguno de los mensajes enviados por dichos terminales móviles, de modo que después del número de retransmisiones fijado por el mecanismo HARQ, ninguno de los terminales móviles implicados recibirá el reconocimiento positivo a la transmisión programada, y por lo tanto deberán reiniciar el mecanismo de acceso, bien inmediatamente, bien dejando pasar un tiempo elegido aleatoriamente dentro de una determinada ventana de contención.
  - b. El eNB es capaz de detectar correctamente la transmisión de uno de los terminales móviles. En este caso el eNB enviará un reconocimiento positivo a dicho terminal móvil, mediante el canal de control PDCCH. Cuando el resto de terminales móviles implicados reciban este reconocimiento sabrán que ha habido una colisión en sus peticiones de acceso y deberán reiniciar el mecanismo de acceso.

---

## 4 SOLUCIONES EXISTENTES PARA LA EXTENSIÓN Y MEJORA DE LA COBERTURA

Actualmente existen soluciones para la extensión de cobertura, la mayoría son utilizadas o se probaron sin éxito en las anteriores generaciones de telefonía móvil. La solución más importante y más utilizada es el repetidor, que no solo se utilizan en telefonía móvil, también se utiliza en innumerables ámbitos de las telecomunicaciones.

También existen otros métodos más complejos en los que mediante el uso de terminales se puede ampliar la cobertura o crear una pequeña red entre terminales LTE.

### 4.1.1 BASADAS EN RETRANSMISORES

Con las nuevas redes LTE se desea tener una velocidad de datos muy alta, para ello sería necesario tener una cantidad de espectro radioeléctrico muy amplia, pero el espectro es limitado y muy caro. Otra opción para tener una alta velocidad sería aumentar la densidad de las estaciones base, pero por desgracia un elevado número de estaciones base da como resultado unos elevados costes de implementación y mantenimiento. La densidad de las estaciones base también está ligada a los niveles de cobertura que pueden tener los usuarios.

Los retransmisores, repetidores o relays [24] son una solución con la que se puede cubrir una zona de cobertura, pudiendo sustituir el despliegue de una estación base, con algunas limitaciones.

Los retransmisores en LTE [25] se basan en los mismos principios que los que se utilizan en las redes UMTS o GSM. Actualmente se utilizan para aumentar la cobertura en zonas con niveles de señal bajo, en túneles, en edificios comerciales e industriales y en otros lugares donde el tráfico es demasiado bajo para justificar la instalación de una estación base.

Se pueden realizar varios tipos de clasificaciones de los relays. Una de ellas es atendiendo al nivel de la pila de protocolos en el que el tráfico de usuario es retransmitido y a las funciones habilitadas en el plano de control [26], en función del uso del espectro [27] o en función de lo transparentes que son para el UE [20].

## Nivel de la pila de protocolos

- **Los relays de nivel 1 (L1 o repetidor):** trabajan en modo “Amplify-and-Forward” (AF), amplificando la señal recibida y volviéndola a transmitir, al igual que un simple amplificador analógico. Su principal ventaja es que el retardo que introducen es mínimo, unos pocos microsegundos. Si existe aislamiento suficiente RF (Radio Frequency) el repetidor puede transmitir y recibir simultáneamente sobre los mismos recursos frecuenciales. Sin embargo al no realizar ningún procesamiento sobre la señal, tanto el ruido como la interferencia se ven amplificados, lo que provoca una degradación de la SINR y consecuentemente del throughput del sistema se ve degradado.
- **Los relays de nivel 2 o 3 (L2 o L3):** trabajan en modo “Decode and Forward” (DF). En este tipo de relay la información es decodificada, procesada y codificada, con lo que se origina un retardo apreciable. A diferencia de los relays L1, el ruido y la interferencia que puedan existir en la entrada no son retransmitidos por el nodo relay. El reenvío se produce a nivel 2 y 3 respectivamente.

En cualquier caso, hay que tener en cuenta que existen un número importante de implementaciones diferentes dependiendo del número de funcionalidades de nivel L2 (corrección de errores, HARQ, scheduling dinámico incluida la adaptación de la modulación y codificación (AMC) en función de las condiciones de canal) y L3 (funciones de gestión de recursos radio (RRC), incluida la gestión de la movilidad). Hay que tener en cuenta que el hecho de que el relay L2 reenvíe la información a nivel 2 no implica que implemente toda la funcionalidad de nivel 2.

Al analizar los distintos escenarios de despliegue potencial de relays, áreas rurales, cobertura en zonas urbanas con alta densidad de usuarios coberturas en zonas interiores, despliegues de emergencia o de redes temporales, es fácil concluir la conveniencia de usar relays L2 o L3. En líneas generales, el uso de un repetidor L1 no es adecuado, ya que amplifica también el ruido y la interferencia, provocando una degradación de la SINR. Por otra parte, en varios de estos escenarios interesa aplicar estrategias de nivel MAC, corrección de errores, HARQ, scheduling dinámico para proporcionar un tratamiento diferenciado a los usuarios en función de las condiciones que experimenten. No obstante, es posible establecer, de forma genérica, las ventajas e inconvenientes de determinados tipos de configuración para este tipo de relays (L2 o L3) en función del escenario de uso.

## Uso del espectro

Existen dos tipos de relays en función del uso del espectro en los diferentes enlaces, en banda y fuera de banda [27] [28] [28].

- **En banda:** en este caso el enlace entre el eNodeB y el relay comparte la misma frecuencia que el enlace entre el relay y el UE.

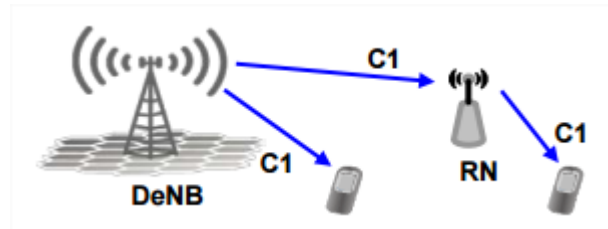


Figura 4.1 Relay en banda [29]

- **Fuera de banda:** en este caso el enlace entre el eNodeB y el relay no comparte la misma frecuencia que el enlace entre el relay y el UE.



Figura 4.2 Relay fuera de banda [29]

Para los dos casos, es posible operar el enlace entre el eNodeB y el relay en la misma frecuencia que el eNodeB está utilizando para comunicarse con el resto de UEs directamente. La utilización de un relay en banda implica o disponer de un muy buen aislamiento entre antena donante y receptora o realizar una separación en tiempo. Si se utiliza un relay fuera de banda, el relay tienen que ser capaz de poder ir cambiando la frecuencia de transmisión y recepción constantemente lo que implica una mayor complejidad que si se utilizan tiempos diferentes.

## Transparencia

Existen dos grupos, los relays no transparentes o tipo 1 y los transparentes o tipo 2.

- **Relay “no transparente” (Tipo 1):** Los UEs son conscientes de la presencia del relay, lo que implica que el relay funciona, desde el punto de vista del UE, como una estación base más o menos compleja, dependiendo

de las funcionalidades consideradas en el plano de control y del nivel en el que se produce la retransmisión de los datos, dentro del plano de usuario. Cada relay tiene su propio identificador de celda (cell ID) y transmite sus propias señales de referencia, canales de control, de sincronización y broadcast de información de sistema. El coste puede ser alto pero permite un despliegue rápido de la red para incrementar la capacidad en una determinada zona o ampliar la cobertura, pudiendo quedar el UE bajo la cobertura de un relay pero no de la estación base.

A nivel funcional, el relay actúa a nivel L3. El usuario, podrá tener enlace directo con la estación base o con el nodo relay para cursar su comunicación, pero no con ambos simultáneamente. El UE recibirá, cuando esté conectado a través del relay, las transmisiones de datos y la información de control (generada en el propio relay o retransmitida de la estación base) directamente del relay. Recibirá información de scheduling y HARQ y mandará también al mismo directamente señalización de control en el Uplink.

El escenario de aplicación óptimo es la extensión de cobertura. Aunque los enlaces de backhaul y acceso pueden ser de calidad comparable al de una comunicación si repetidor, la cantidad de recursos necesarios para la transmisión en dos saltos es doble, por lo que la ganancia de capacidad asociada al uso del relay, con respecto a colocar una nueva estación base, es menor. Por otra parte, al desplegar un relay en lugar de una estación base, se pierde capacidad de duplexado real. Por último, si se asume el despliegue de los relay dentro de la zona de cobertura de la estación base como medio para aumentar la capacidad, las comunicaciones pueden sufrir interferencias adicionales provenientes de estaciones base y de relays, de la propia celda o de celdas adyacentes. Todos estos aspectos, hacen que la ganancia de capacidad real en un despliegue fijo con este tipo de relays sea bastante cuestionable si no se diseñan estrategias de reparto y gestión de recursos de manera eficiente.

- **Relay “transparente” (Tipo 2):** Este tipo de relay, tiene un coste mucho menor que el relay tipo 1. Se caracteriza por no tener cell ID propio, por lo que no puede crear nuevas celdas. El relay dispone del mismo identificador de celda que la estación base, lo que permite que el usuario conmute la comunicación entre nodos relay y estaciones base sin necesidad de efectuar un handover. Este repetidor actúa a nivel L2.

La comunicación de los UEs con la estación base a través de este tipo de relays es transparente para los usuarios, que no serán conscientes de la existencia de los mismos. Si el relay es transparente, necesariamente el

scheduling estará centralizado en la estación base. Todos los UE y relays dentro de la zona de cobertura de la estación base están sincronizados con la estación base y deben obtener la información de control (sincronización, selección adaptativa, subportadoras y potencia; asignación de recursos en DL y UL) directamente de la estación base, lo que reduce el overhead de señalización. Es posible aplicar técnicas de transmisión cooperativa, en las que se combina las señales transmitidas por el relay y la estación base, para mejorar la eficiencia.

Para el cometido que se busca en este proyecto de extensión de cobertura en un entorno rural, convendría la utilización de relays de tipo 2. El objetivo es disponer de un dispositivo de bajo coste que permita aumentar la capacidad global en la zona de cobertura de la estación base, y no tanto la tasa de transmisión de una comunicación concreta.

#### 4.1.2 BASADAS EN UTILIZACIÓN DE TERMINALES

Una de las ideas que se está investigando, desde la Release 12 del 3GPP, es el concepto de comunicación directa entre dispositivos conocido como ProSe o D2D [31]. Esta idea ya ha estado presente en anteriores tecnología como UMTS. Se introdujo por primera vez por el ETSI en 1996 y el 3GPP la adoptó pasando a denominarse ODMA (Oportunidad-Driven Multiple Access) [32] La idea era mantener altas velocidades de datos en los bordes de cobertura a través de repetidores, todo basado en TDD. Debido a la complejidad del proyecto, se abandonó en 1999.

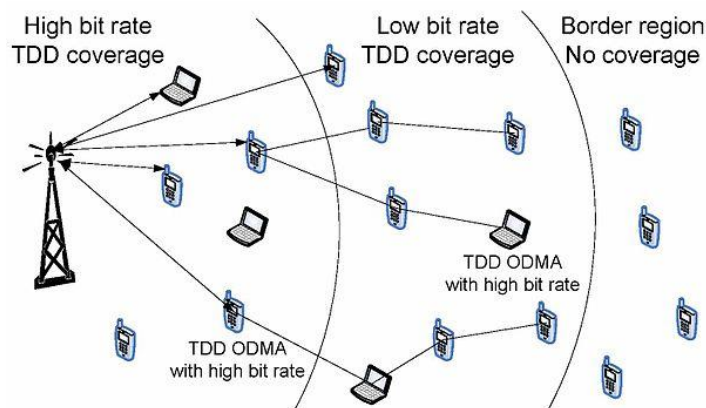


Figura 4.3. Oportunidad-Driven Multiple Access



D2D nace con la idea de funcionar como un enlace punto a punto que no utiliza la infraestructura de la red celular, pero permite a los dispositivos LTE comunicarse directamente entre sí cuando se encuentran en las proximidades.

Una de las aplicaciones donde el D2D puede resultar útil es para los servicios de emergencia. Los sistemas propietarios como TETRA son caros de mantener debido a la infraestructura separada se requieren, por lo que poder utilizar la red LTE para este cometido cada vez más atractivo debido a su coste y rendimiento. El principal problema actual es la fiabilidad.

La comunicación D2D también está siendo investigado para aplicaciones comerciales donde poder localizar el terminal y, por ejemplo, ofrecerle servicios en función de su posición.

Los principales beneficios de las comunicaciones D2D son:

- **Comunicaciones instantáneas:** los terminales no tienen que utilizar la infraestructura de red, se podrían comunicar entre un número determinado de dispositivos de la misma forma en que se utilizan los walkie-talkies. Esto podría ser utilizado por los servicios de emergencia.
- **Uso del espectro con licencia:** A diferencia de otros sistemas D2D como WiFi, Bluetooth, etc., LTE usaría espectro con licencia lo que permitiría que las frecuencias que se utilizarán estuvieran menos sujetas a interferencias, lo que permite comunicaciones más fiables
- **Reducción de la interferencia:** Al no tener que comunicarse directamente con una estación base, se requieren menos enlaces lo que reduce la cantidad de datos que se transmiten dentro de una asignación del espectro dado. Esto reduce el nivel global de interferencia.
- **Ahorro de energía:** Al producirse la comunicación entre dispositivos que se encuentran próximos el nivel de potencia de transmisión que se requiere es inferior.

Algunas empresas como Qualcomm, ya están lanzando las primeras aplicaciones basadas en D2D cuya denominación comercial es LTE Direct [32]. La idea principal es permitirnos estar conectados con nuestro entorno y, a la vez, que el entorno lo esté con nosotros. Así, a través de la utilización de nuestro teléfono y de sensores instalados a nuestro alrededor, *ibeacons*, podremos obtener informaciones tales como promociones, conciertos, publicidad de nuestro interés y cualquier dato referente a negocios que estén en un radio de 500 metros. También se podrían obtener alertas referentes a personas con intereses comunes, amigos que estén cerca nuestro o cualquier otra aplicación que imaginemos.

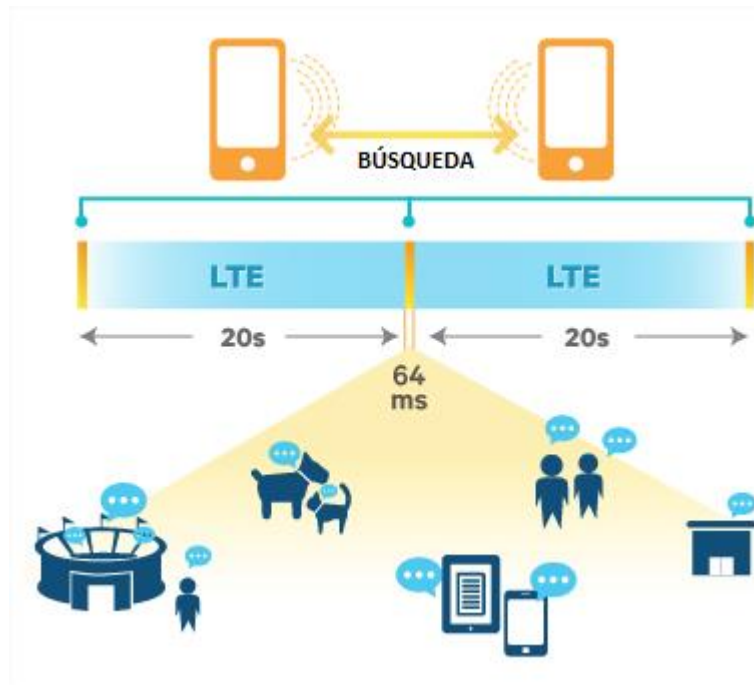


Figura 4.4. Todos los dispositivos despiertan un breve periodo de tiempo para buscar, transmitir o recibir [32]

---

## 5 SIMULACIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1 OBJETIVOS Y ESCENARIO DE SIMULACIÓN

El objetivo principal de las simulaciones es poder comparar, bajo un mismo escenario, una serie de criterios y posibles soluciones.

Se van a realizar diversas simulaciones, en primer lugar, para analizar la cobertura que un nodo LTE puede proporcionar en la zona de estudio y en segundo lugar, se realizarán simulaciones con las diferentes posibles soluciones al problema de extensión de cobertura con un terminal intermedio.

El escenario escogido para las simulaciones es el mismo en el que se realizaron las medidas de campo. Para la colocación de la estación base LTE se ha elegido la misma ubicación que la existente en el drive test **Figura 5.1**. Es un emplazamiento en el que actualmente un operador nacional posee equipos GSM/UMTS y todos los equipos necesarios para su funcionamiento, equipos de alimentación, de fuerza, de transmisión etc. De esta manera se aprovecharía parte de la infraestructura actual y solo se requeriría una actualización de ciertos equipo.

La orientación de los sectores del emplazamiento que cubre la zona de estudio es la que actualmente tiene definida el operador. El sector número 2 (amarillo), es el sector que cubre la zona de estudio. La zona objetivo actual de este sector es la carretera M-604, el Monasterio de Santa María de El Paular y las piscinas naturales Las Presillas.

La primera simulación tiene como objetivo conocer el alcance que tendría la señal LTE fuera de la zona objetivo actual del nodo, principalmente la ruta de las Cascadas de Purgatorio, que es la zona en la que estamos interesados.

En la segunda simulación se coloca un repetidor fijo en un punto óptimo para cubrir la zona deseada y se analiza la cobertura en las diferentes zonas.

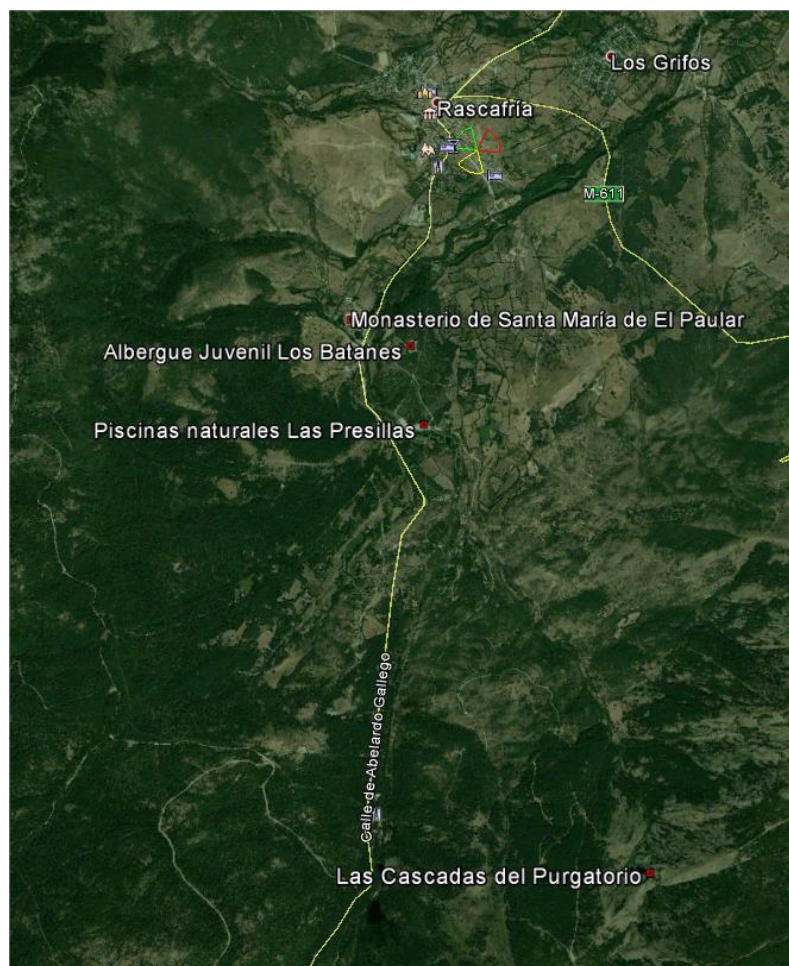


Figura 5.1. Vista general y lugares destacados de la zona de estudio

## 5.2 DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR

Se va a utilizar la herramienta de simulación XIRIO-Online [33]. Esta herramienta permite realizar simulaciones profesionales de cobertura radioeléctrica en cualquier parte del mundo en entornos rurales y urbanos utilizando cartografía de alta resolución. Con XIRIO-Online se pueden diseñar redes sin disponer de herramientas ni cartografías digital propias y bajo un modelo de “pago por uso”.

XIRIO-Online, desarrollado por la empresa APTICA [2], presenta dos módulos de trabajo independientes: PLANNINGTOOL, como herramienta de planificación radioeléctrica genérica y SHAREPLACE como aplicación de consulta e intercambio de resultados. En nuestro caso se utilizará únicamente el primer módulo.

PLANNINGTOOL es una herramienta de planificación radioeléctrica genérica, que puede utilizarse para diseñar diferentes tecnologías inalámbricas: comunicaciones móviles públicas (GSM, DCS, UMTS, LTE,...), radiodifusión (TV, DVB-T, FM, DAB, DVB-H,...), sistemas de comunicaciones móviles profesionales (PMR, TETRA,...), radioenlaces (PDH, SDH,...) y redes de acceso (LMDS, WIMAX, WiFi,...).

XIRIO-Online incluye los métodos de cálculo más habituales, algunos de ellos son: Rec. UIT-R P.530, Rec. UIT-R P.1411, COST231, Xia-Bertoni, trazado de rayos, Okumura-Hata, métodos ajustados a medidas, etc. Estos métodos contienen los parámetros necesarios para poder ajustar los modelos, en función de las necesidades del proyecto.

En lo referente a la cartografía, la herramienta utiliza el visor de Google Maps para ver los resultados, pudiéndose exportar las medidas a otros sistemas de información geográfica. Incorpora modelos del terreno y de superficie en 3D tanto para zonas rurales como urbanas.

XIRIO-Online PLANNINGTOOL permite el acceso a la herramienta y la realización de cálculos a baja resolución de forma gratuita. Convirtiéndose en una herramienta de pago cuando se desean obtener unos resultados en alta resolución.

Referente a los cálculos que se pueden realizar en XIRIO-Online con LTE, se pueden realizar dos tipos de simulaciones:

- **Cobertura estática** de la red. Se obtiene como resultado la potencia recibida de la señal de referencia (RSRP) representada en un mapa.
- Análisis estático de **interferencia SINR**. Inicialmente la carga de tráfico soportada por cada estación base no es conocida. De este modo se realiza un análisis estático de interferencia SINR a partir de la carga de tráfico configurada en los parámetros LTE de los sectores.
  - Este cálculo proporciona, mediante una serie de manchas de cobertura y sin necesidad de un análisis de capacidad, una idea aproximada de la cobertura de la red en las condiciones de carga definidas por el usuario.
- Análisis de **capacidad**. A partir de una distribución de usuarios en entornos y el análisis estático de interferencias SINR previo, XIRIO-Online obtiene un resultado aproximado de la demanda de recursos de la red.

En el caso que nosotros vamos a estudiar se realizarán una serie de simulaciones de cobertura estática de la red, para poder realizar una comparativa

de los diferentes resultados en función de diferentes parámetros y configuraciones del entorno y de los equipos.

#### 5.2.1 CONFIGURACIONES GENÉRICAS DEL SIMULADOR

- **Cartografía**

Dependiendo de la zona de servicio para la red a planificar puede requerir del empleo de cartografía rural, urbana o mixta en la que varía principalmente la resolución del terreno. En la cartografía del terreno es necesario como mínimo la información de los niveles altimétricos del terreno, aunque en ciertos cálculos también es aconsejable disponer de información acerca del uso del suelo sobre el que se hace el cálculo.

En nuestro caso, todos los escenarios a simular se encuentran en entornos rurales por lo que se ha empleado una capa MDT [34] o de altimetría con un modelos del terreno de entre 25 y 100 metros de resolución.

- **Métodos de cálculo**

Existen diferentes modelos de propagación que se pueden utilizar para calcular la cobertura estática de la red en función de la frecuencia y del entorno a analizar. De los métodos de cálculo que ofrece XIRIO-Online para entornos rurales se ha escogido un método determinístico, Rec. ITU-R 526, por ser el que cumple con los requisitos necesarios

Rec. ITU-R 526 [36] es un método determinístico basado en difracción. Válido para frecuencias mayores de 30 MHz. Se emplea en todos los servicios radioeléctricos en entornos rurales y mixtos siempre que se disponga de cartografía de media o alta resolución. El modelo de propagación Rec ITU-R P. 526 se basa en las siguientes premisas:

En general, las pérdidas básicas de propagación se obtienen del siguiente modo:

$$L_b = L_{bf} + L_{ex} + L_{ent}$$

(EC 1)

Siendo:

- $L_b$ : pérdidas básicas de propagación.
- $L_{bf}$ : pérdida básica en condiciones de espacio libre.

- $L_{ex}$ : pérdida en exceso debida a los efectos del terreno en el trayecto de propagación.
- $L_{ent}$ : pérdida debido a los efectos del entorno inmediato del receptor.

El método para la estimación de pérdidas en espacio libre viene definido en la Recomendación ITU-R P.525 [37].

En el caso de  $L_{ex}$  (pérdida en exceso), “existen formulados un conjunto de métodos que proporcionan los valores medianos de dicho valor y que son comúnmente utilizados. En una primera clasificación, los métodos aplicables pueden basarse en modelos más o menos simplificados de la óptica geométrica, denominándose determinísticos”.

Adicionalmente, estos métodos pueden tener en cuenta correcciones obtenidas de extensas campañas de medidas y que permiten caracterizar de un modo más aproximado, las condiciones o modos de propagación dominantes en determinados entornos (rural, urbano, suburbanono, etc.). Dichos métodos, denominados empíricos o semi-empíricos, en función del peso de las medidas de campo en relación al modelo teórico, son aplicables siempre que las condiciones de propagación del sistema en estudio sean equiparables a las utilizadas en la formulación del método. Proporcionan, en general, el valor mediano de la pérdida básica de propagación.

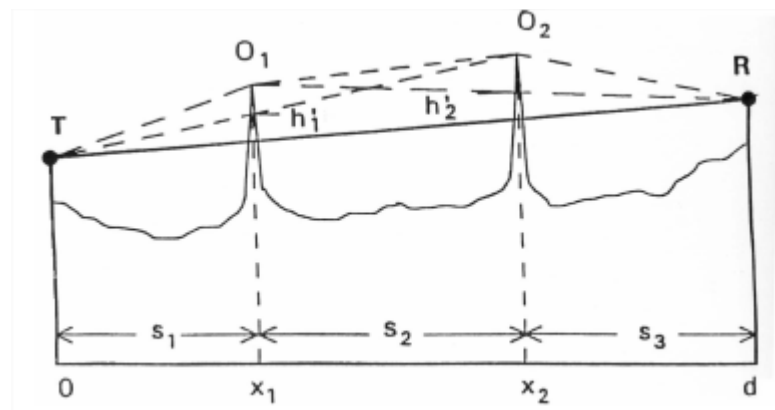


Figura 5.2. Método de propagación Rec. UIT-R P.526 [36]

El resultado de la aplicación de éste método es un valor mediano de las pérdidas en el trayecto, lo que permite estimar el valor de campo eléctrico disponible en el punto de recepción.

El criterio para estimar si dicho punto se puede considerar cubierto por la estación en estudio es la simple comparación con el umbral de recepción



establecido para una calidad de servicio dada. Estos umbrales de recepción se corresponden con los valores de campo mínimo equivalente para 50% de tiempo y ubicaciones.

### 5.3 CONSIDERACIONES DE LA UTILIZACIÓN DE DIFERENTES BANDAS EN LTE

La telefonía móvil de cuarta generación puede utilizar diferentes frecuencias según la legislación de cada país. En España, las bandas LTE asignadas son 800MHz, 1800MHz y 2600MHz. LTE ofrece gran flexibilidad a los operadores para determinar el espectro en el cuál desplegar sus redes. Mientras que WCDMA/HSPA usan canales fijos de 5MHz, la cantidad de ancho de banda para LTE puede ser escalada desde 1.25MHz hasta 20MHz. Esto significa que una red LTE puede ser lanzada con una cantidad de espectro pequeño sobre los servicios actuales, y agregar más ancho de banda conforme los usuarios migren a la nueva tecnología. Esto también permite a los operadores formular diferentes estrategias para aprovechar los recursos de espectro que tienen disponibles.

En el entorno rural en el que se desarrolla este proyecto la banda LTE que cumpliría un mayor número de requisitos sería la banda de 800MHz. Utilizar una banda baja de frecuencia ofrece ciertas ventajas, respecto a las bandas de 1800MHz y 2600MHz, que a continuación se enumeran.

- **Mejores características de propagación**

Al operar en una banda menor de frecuencia que las otras dos opciones, la banda de 800MHz ofrece una atenuación en función de la distancia menor.

Para demostrar esta afirmación se ha realizado una comparativa entre las frecuencia licenciadas en España para el LTE: 800MHz, 1800MHz y 2600MHz.

Para ello se ha utilizado el modelo de propagación COST-231 Hata [37]. Es un modelo semi-empírico de predicción pérdidas, es una extensión en frecuencia del modelo de propagación Okumura – Hata. Se ha elegido este modelo ya que es válido para entornos rurales y se puede utilizar en las bandas de LTE.

No se ha utilizado la Recomendación ITU-R 526, que se utiliza en las simulaciones, debido a la complejidad matemática necesaria para poder realizar la comparativa entre las diferentes bandas de LTE. En este punto únicamente se desea realizar una comparación teórica de las pérdidas de propagación en función de la frecuencia utilizada, por lo que cualquier modelo de propagación valido para las bandas y características del proyecto se puede utilizar.



Requisitos del modelo COST-231 Hata [37]:

- Frecuencia: 150–2000 MHz
- Altura terminal móvil: 1–10 m
- Altura antena estación base: 30–200 m
- Distancia: 1–30 km

La expresión de las pérdidas del modelo de propagación COST-231 viene dadas por la siguiente expresión [38]:

$$L = 46.3 + 33.9 \log f - 13.82 \log h_B - a(h_R) + [44.9 - 6.55 \log h_B] \log d + C$$

(EC 2)

$$a(h_R) = \begin{cases} (1.1 \log f - 0.7) h_R - (1.56 \log f - 0.8) & \text{(Zonas suburbanas y rurales)(EC 3.1)} \\ (3.2(\log(11.75 h_R))^2 - 4.97 & \text{(Zonas urbanas)(EC3.2)} \end{cases}$$

(EC 3)

$$C = \begin{cases} 0 & \text{(Ciudades medianas)(EC4.1)} \\ 3 & \text{(Zonas urbanas densas)(EC4.2)} \\ -2 \log \left( \frac{f}{28} \right)^2 - 5.4 & \text{(Zona suburbana y rural con vegetacion)(EC4.3)} \\ -4.78(\log(f))^2 + 18.33 \log(f) - 40.94 & \text{(Zonas rurales)(EC4.4)} \end{cases}$$

(EC 4)

Siendo:

- L: Pérdidas de propagación.
- f: frecuencia.
- $h_b$ : Altura del terminal (1.5m).
- $h_r$ : Altura de la antena (30m)
- d: distancia entre antena y terminal.

El área de estudio es una zona rural y la mayor parte del terreno es una zona montañosa con vegetación. Para la altura de la antena se ha utilizado la expresión **(EC 3)**. Se ha utilizado la expresión

**(EC 4)** para la comparativa.

Se han mantenido constantes las alturas del terminal y antena, variando la frecuencia y la distancia. En la **Figura 5.3** se pueden observar los resultados de la comparativa y como aumentan las pérdidas al aumentar la frecuencia.

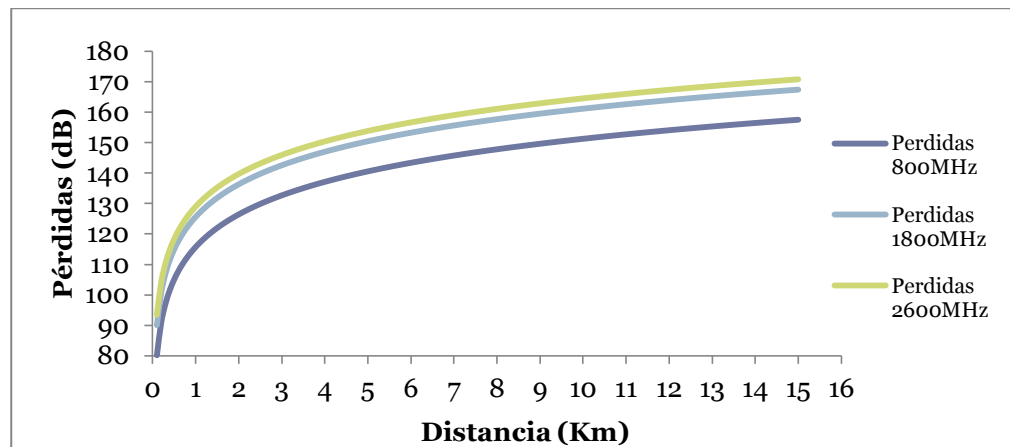


Figura 5.3. Comparativa modelo COST-231 Hata en las diferentes frecuencias

- **Mayor penetración zonas densas de vegetación.**

En un entorno rural, en la que puede existir vegetación abundante, es importante tener en cuenta cómo afecta la vegetación a la propagación de las ondas y que frecuencia puede resultar más aconsejable.

Como norma general, la penetración de las ondas electromagnéticas disminuye con la frecuencia, por lo teniendo una frecuencia menor se conseguirá una mayor penetración en zonas boscosas o con cualquier tipo de vegetación.

Según la Rec. UIT-R P.1411-2 [40] los efectos de la vegetación, principalmente los árboles, en la propagación son importantes para las predicciones de los trayectos cortos en exteriores. Se pueden identificar dos mecanismos principales de propagación:

- propagación a través de los árboles (no alrededor ni por encima).
- propagación sobre los árboles.

El primer mecanismo predomina para las geometrías en las que ambas antenas están por debajo de la copa de los árboles y la distancia a través de ellas es pequeña, mientras que el segundo predomina para aquellas geometrías en las que una antena está por encima de las copas de los árboles. La atenuación resulta muy afectada por la dispersión multitrayecto debida a la difracción de la energía de la señal sobre las estructuras de los árboles y a través de éstas.

Para evaluar la atenuación debida a la vegetación en frecuencias comprendidas entre 30 MHz y 60 GHz se recomienda utilizar la Rec. UIT-R P.833-4 [41].

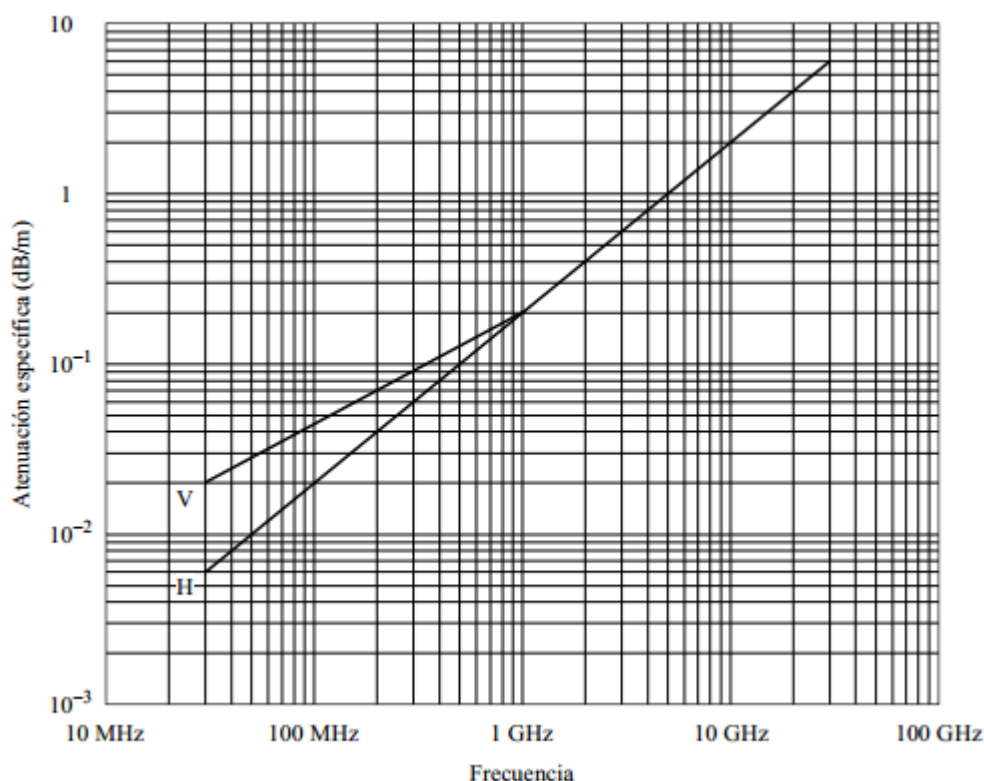


Figura 5.4. Atenuación específica en zona boscosa en función de la frecuencia Rec. UIT-R P.833-4 [41]

- **Coste de despliegue y mantenimiento menor**

Como se ha demostrado en los puntos anteriores, una menor frecuencia tiene una menor atenuación y por tanto un mayor alcance. Por ello, el coste disminuye al utilizar una banda menor, ya que son necesarias menos estaciones base para cubrir una misma extensión de terreno.

A menor frecuencia se consigue una disminución del CAPEX, ya que es necesaria una menor inversión en equipos e instalaciones (eNodosB, antenas, radioenlaces...). También se produce una disminución del OPEX, a tener un menor número de equipos y emplazamientos se tienen unos costes de mantenimiento y alquiler menores. A modo de ejemplo, según la CNMC el coste medio en un entorno rural de un emplazamiento es de 4000€ anuales [41]. En entornos urbanos el coste puede aumentar hasta 16200€ de media.

#### 5.3.1.1 SIMULACIÓN DEL ENTORNO DE LAS DIFERENTES BANDAS DE FRECUENCIAS

A continuación se han realizado unas simulaciones de cobertura, a modo de comparación, del sector que cubriría la ruta si tuviera desplegado LTE, en las diferentes bandas de 800MHz, 1800MHz y 2600MHz. La zona en la que se realiza la simulación es la misma en la que se obtuvieron las medidas iniciales en el punto 2.4.1 Resultados de las medidas.

Los parámetros básicos del sistema radiante del eNodoB que se han escogido para las simulaciones son los que se pueden ver en la **Tabla 5.1**, se han mantenido todos los parámetros físicos, variando únicamente las frecuencias.

Los diagramas de radiación de las antenas de la eNodoB **Figura 5.5** y **Figura 5.6** y los diagramas del terminal **Figura 5.7** y **Figura 5.8** se han obtenido de los modelos de antenas existentes en la herramienta de simulación XIRIO-Online.

Parámetros antena	LTE 800MHz	LTE 1800MHz	LTE 2600MHz
Altura de la antena	27 m	27 m	27 m
Orientación de la antena	200°	200°	200°
Tilt	5°	5°	5°
Potencia salida	40W	40W	40W
Pérdidas	10dB	10dB	10dB
Antena	3G/4G Antena Ganancia = 17,5 dBi 65°	3G/4G Antena Ganancia = 17,5 dBi 65°	3G/4G Antena Ganancia = 17,5 dBi 65°
Polarización	Vertical	Vertical	Vertical
Frecuencia	842Mz	1825MHz	2565MHz

Tabla 5.1. Parámetros básicos del eNodeB

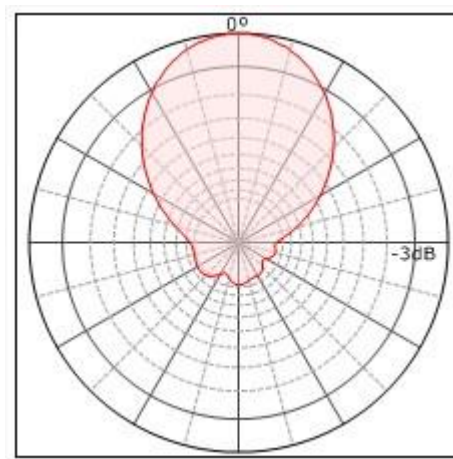


Figura 5.5. Diagrama horizontal de radiación de la antena del eNodeB

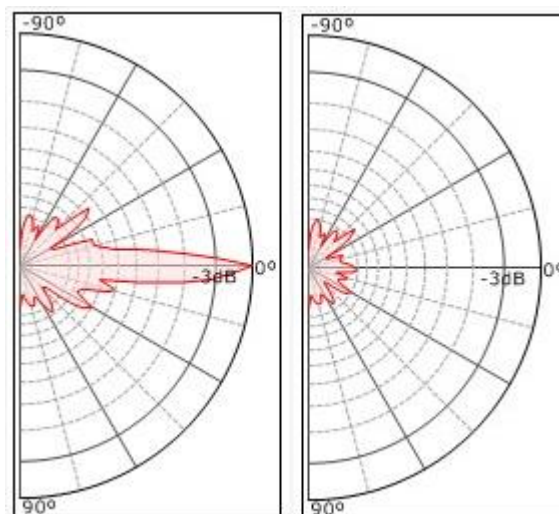


Figura 5.6. Diagrama vertical de radiación de la antena del eNodeB a 0° y 180°

Al igual que en los parámetros del eNodeB, en los parámetros del terminal únicamente se ha modificado las frecuencias de transmisión/recepción, manteniendo el resto de valores iguales.

Parámetros terminal	LTE 800MHz	LTE 1800MHz	LTE 2600MHz
Altura de la antena	1.5 m	1.5 m	1.5 m
Pérdidas	3 dB	3 dB	3 dB
Potencia transmisión	23 dBm	23 dBm	23 dBm
Antena	3G/4G Antena Ganancia 2 dBi Omnidireccional	3G/4G Antena Ganancia 2 dBi Omnidireccional	3G/4G Antena Ganancia 2 dBi Omnidireccional
Polarización	Vertical	Vertical	Vertical
Frecuencia	801MHz	1730MHz	2535MHz
RSRP threshold	-110dBm	-110dBm	-110dBm

Tabla 5.2. Parámetros básicos del terminal móvil

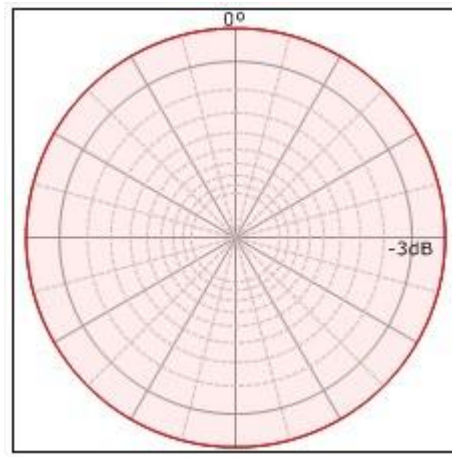


Figura 5.7. Diagrama horizontal de la antena del terminal móvil

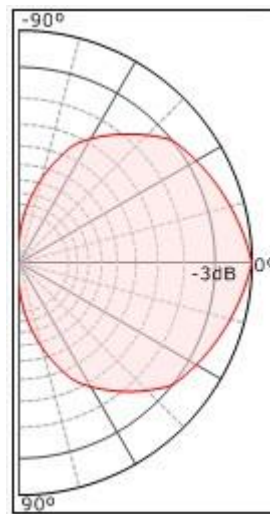


Figura 5.8. Diagrama vertical a 0° de la antena del terminal móvil (a 180° sería un diagrama simétrico)

Cálculo cobertura	
Método de cálculo	Rec ITU-R P. 526-10
Factor K	1.33
Margen de desvanecimiento	10
Permitividad relativa	5
Conductividad	0.005 S/m

Tabla 5.3. Método y parámetros para el cálculo de la cobertura

Cartografía	
Capa	Altimetría mundial
Tipo	MDT
Resolución	100m
Proveedor	APTICA

Tabla 5.4. Cartografía

A continuación se muestran los resultados obtenidos mediante la simulación en XIRIO-Online utilizando los parámetros anteriormente descritos. En la **Figura 5.9** se puede ver la leyenda de los diferentes niveles de señal. En el nivel más bajo de señal, el rojo, la señal se recibiría con uno niveles tan bajos y con una calidad tan mala que resultaría prácticamente imposible realizar la conexión.






Rangos de señal	
	Sin señal
	(-112.5, -106.5) dBm
	(-106.5, -92.5) dBm
	(-92.5, -85.5) dBm
	(-85.5, -) dBm

Figura 5.9. Rango de valores de la señal





Figura 5.10. Simulación LTE 800MHz

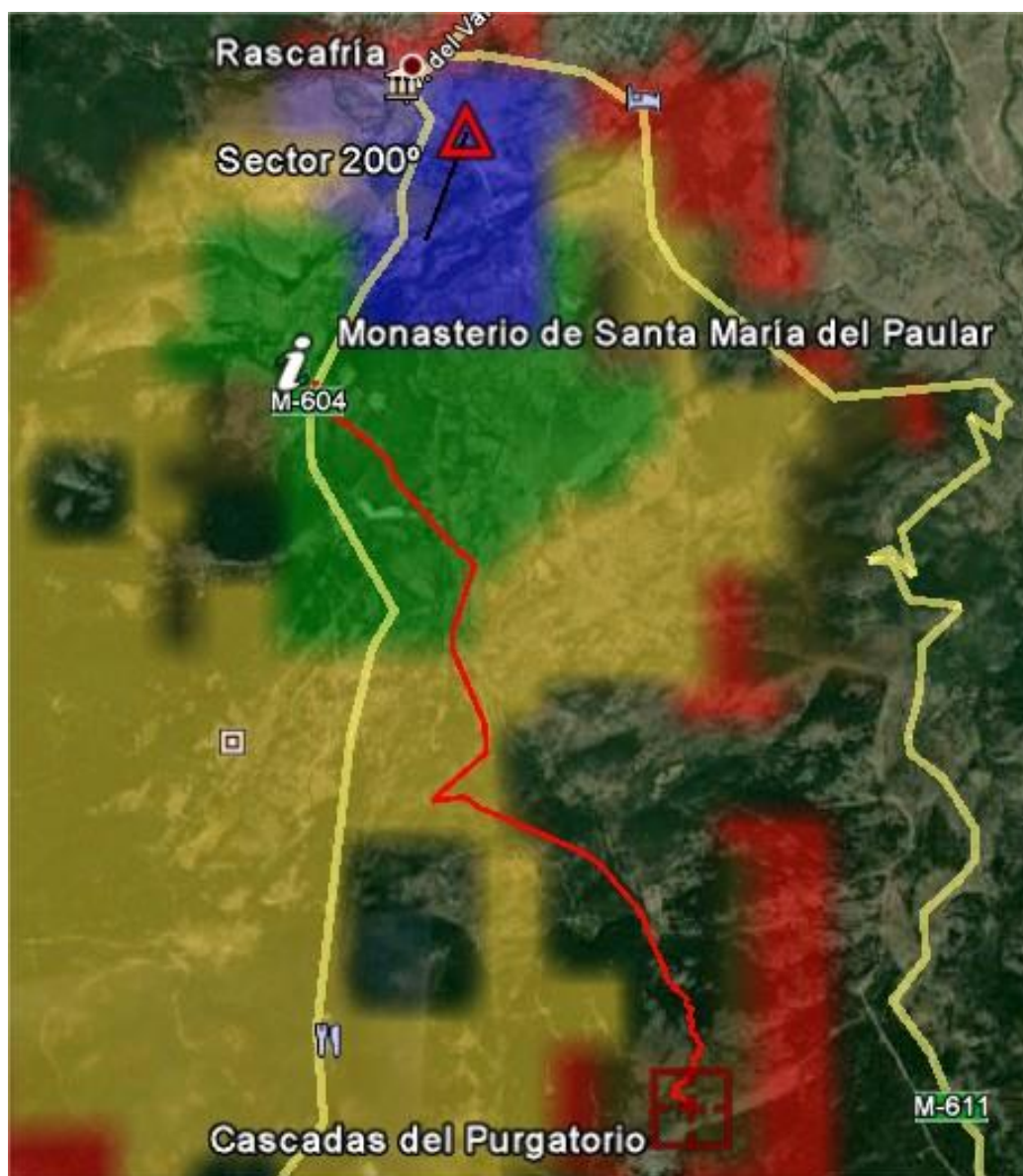


Figura 5.11. Simulación LTE 1800MHZ

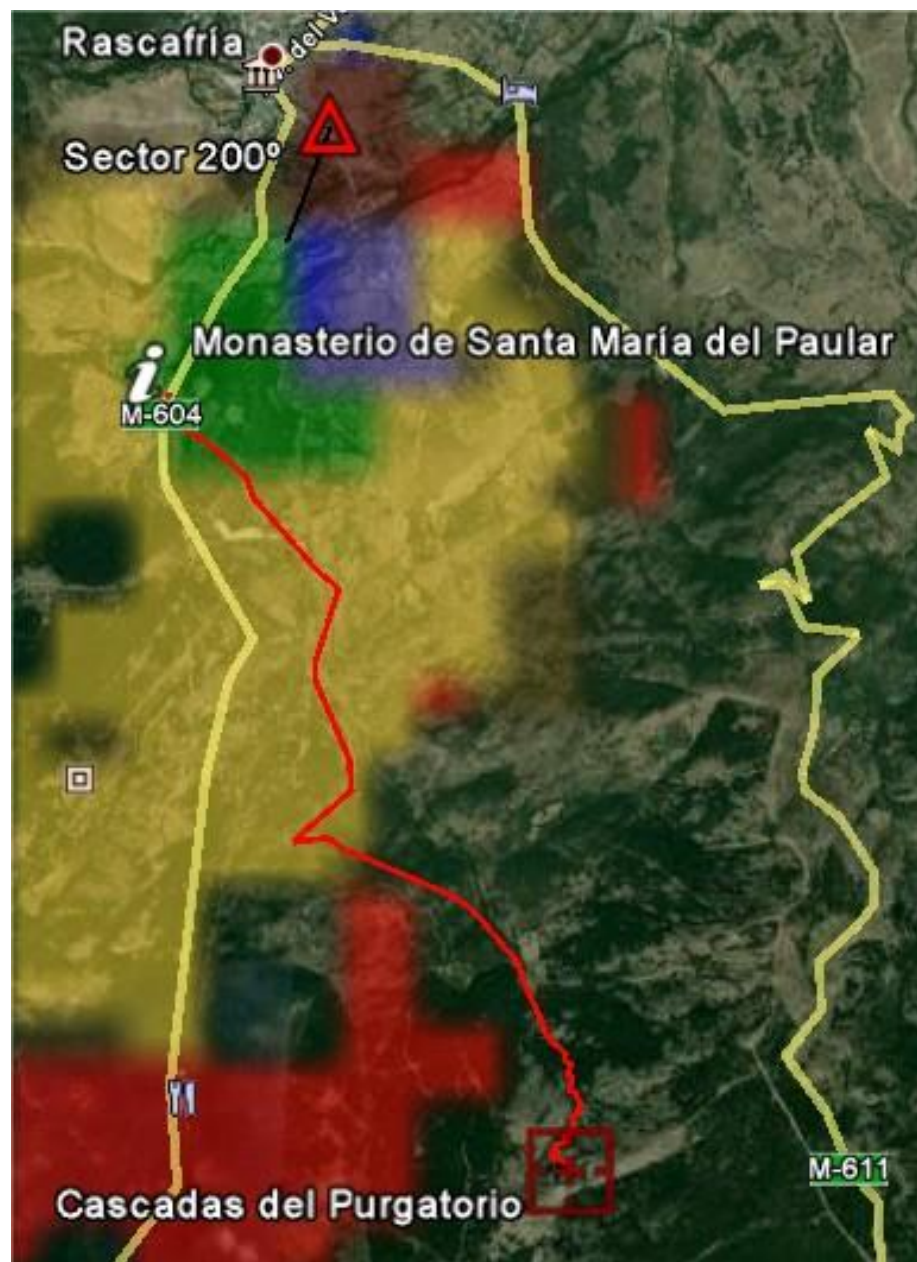


Figura 5.12. Simulación LTE 2600MHZ

Como se puede observar en la **Figura 5.10** en la banda de 800MHz la zona objetivo actual del sector quedaría cubierta con excelente niveles de señal. En la banda de 1800Mhz, **Figura 5.11**, también tendríamos unos buenos niveles.

El problema se encontraría en la banda de 2600Mhz, ya que no cubriría con buenos niveles la zona de las piscinas naturales. A demás como se puede observar en la **Figura 5.12** tampoco quedaría cubierta la zona más próxima al nodo, para cubrir esta zona tendríamos que bajar la inclinación de la antena (tilt). Si realizáramos este cambio, mejoraríamos la zona más cercana al nodo, pero aún serían peores los niveles de señal en las zonas más alejadas del nodo.

Centrándonos en la ruta que nos interesa analizar, se puede observar que ninguna de las 3 frecuencias cubre en su totalidad el trayecto. Se podrían buscar algunas soluciones realizando cambiando en el *tilt*, ajustando la orientación de la antena o ajustando algunos parámetros en el sector, pero seguramente repercutiría negativamente en el resto de zonas cubiertas por la celda, que son más prioritarias por cubrir una zona con un mayor número de personas.

Por ello se necesita una nueva solución para la extensión y mejora de la cobertura, en las zonas con nula o deficiente cobertura. En el siguiente apartado se tratarán diferentes soluciones para esta necesidad, en todas ellas se utilizará la banda de 800MHz por todas las ventajas que en este apartado se han desarrollado: unas mejores características de propagación, una mayor penetración en zonas densas de vegetación, un coste de despliegue y mantenimiento menor y por ultimo las simulaciones realizadas.

## 5.4 SIMULACIÓN CON REPETIDOR

Con la estación base LTE simulada en el punto anterior, no es posible cubrir toda la zona objetivo. Una posible solución existente para la extensión y mejora de la cobertura en la zona deseada es la utilización de un repetidor. También podíamos haber elegido la utilización de una estación base nueva, pero como se vio en puntos anteriores supondría una inversión muy poco rentable. Para la instalación de un repetidor son necesarios dos requisitos principales:

- **Una zona con unos niveles de señal aceptables**

El repetidor recibirá la señal y la amplificará, por lo que si se recibe una señal de mala calidad o con mucho ruido el repetido podrá estar amplificando el ruidos o no será capaz de recuperar la señal para poder repetirla, provocando una degradación en la zona, en vez de una mejora.



- **Una fuente de alimentación**

Existen tres opciones para alimentar el repetidor. La primera es la instalación de un sistema de energía alternativa mediante la utilización de energías renovables, como la solar o eólica, o la utilización de un generador eléctrico diésel. La segunda es realizar una nueva acometida eléctrica. La tercera es el aprovechamiento de una acometida eléctrica existente.

La primera opción tiene la ventaja de que se podría instalar el repetidor en cualquier lugar, ya que no depende de que exista un acceso a la red eléctrica. Aunque el gasto en equipos sería superior a las otras dos opciones. En el caso del generador diésel sería necesaria la instalación del propio generador y de equipos de regulación. Para las energías renovables sería necesaria la instalación de unos módulos fotovoltaicos y/o eólicos, un acumulador eléctrico, equipos de regulación y control, un inversor de corriente, etc.

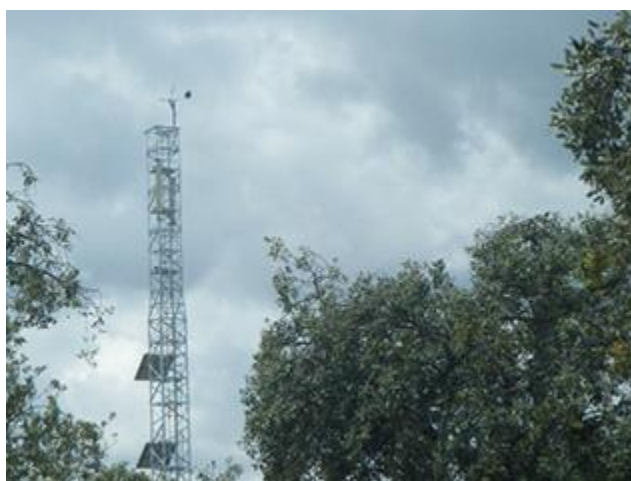


Figura 5.13. Repetidor de telefonía móvil con placas solares y generador eólico

La segunda opción implica una inversión inicial para la realización de la acometida eléctrica, esta opción apenas tiene costes de mantenimiento. Para que esta opción sea factible es necesario instalar el repetidor en una zona lo más próxima a una línea de baja tensión.

La tercera opción, la utilización de una acometida existente, es la que resultaría más económica. Para ello es necesario encontrar un emplazamiento en el cual exista una edificación, finca o lugar con una conexión a la red eléctrica.

Para la simulación se han barajado varias localizaciones para la ubicación del repetidor. La localización elegida cumple los principales requisitos que veíamos anteriormente, posee unos niveles de señal aceptables y se encuentra en las inmediaciones de una edificación con energía eléctrica, por lo que se podría aprovechar parte de la infraestructura existente. También posee un fácil acceso y tiene una buena visión de la zona que se desea cubrir y de otras zonas que resultaría también interesante cubrir.

Se ha elegido un repetidor de LTE 800 MHz con una potencia de salida cercana a los 10W. La antena donante estaría orientada a entre  $0^{\circ}$  y  $10^{\circ}$  con el fin de obtener la mejor señal posible de la estación base situada en Rascafría.

En la simulación solo se ha tenido en cuenta la orientación que nos interesa para nuestro objetivo, que es  $145^{\circ}$ , pero si se instalase un repetidor como el de la simulación, sería interesante tener otro sector, a unos  $190^{\circ}$ , que cubriera la zona de la carretera que tiene un nivel de señal muy bajo.

Como se puede observar en la simulación **Figura 5.14** la cobertura mejoraría entre los puntos 4 y 5, aunque en esos puntos ya se disponía de señal sin el repetidor. Entre los puntos 5 y 7 sin el repetidor no se disponía de cobertura, con la instalación de repetidor siguen quedando algunas zonas sin señal, pero se mejora considerablemente. El final de la ruta al ser una zona de difícil acceso, la señal del repetido no puede cubrir el área.



Figura 5.14. Simulación LTE 800Mhz con repetidor

## 5.5 CONCLUSIONES

En vista de las simulaciones realizadas, no es posible cubrir la totalidad de la zona objetivo con las opciones actuales.

La utilización de las diferentes bandas de LTE estará condicionada al uso final que se le quiera dar a la red, una mayor capacidad o una mejor cobertura. En entornos rurales y de montaña, como el que se analiza en este proyecto, el principal objetivo es dotar de cobertura la mayor zona posible, lo que conlleva una merma de la capacidad y velocidad de la red. Como se ha analizado en las simulaciones la

mejor banda para llevar a cabo este cometido es LTE 800, principalmente dada su mejor propagación.

A pesar de utilizar la banda de 800 MHz la cobertura resulta insuficiente, por lo que es necesario la instalación de algún equipo que pueda mejorar esta cobertura, en este caso se optó por un repetidor.

Con la utilización de un repetidor la cobertura mejoró notablemente, pero debido a las limitaciones del repetidor y las dificultades del terreno resulta imposible cubrir todo el territorio objetivo con unos costes razonables.

La solución ideal sería poder tener una mayor densidad de estaciones móviles o repetidores, al no ser posible esto, una posible solución que se analizará en el siguiente punto es utilizar los propios terminales móviles como pequeñas estaciones móviles o repetidores. De esta manera se podría crear una pequeña red en la que unos terminales ayudarían a otros a conectarse a la red, ampliando la zona de cobertura. Podrían considerarse como pequeños repetidores móviles.



---

## 6 NUEVAS SOLUCIONES PARA LA EXTENSIÓN Y

### MEJORA DE LA COBERTURA

#### 6.1 INTRODUCCIÓN

Una de las primeras mejoras que ha introducido LTE para aumentar la extensión y cobertura ha sido la posibilidad de utilizar la banda de frecuencia de 800MHz, como se ha analizado en el apartado 5.3. Gracias a la mayor propagación de las frecuencias bajas se puede dotar de cobertura una mayor zona.

También dentro del estándar de LTE se ha trabajado para que el sistema pudieran alcanzar las mejores prestaciones a una distancia máxima de 30 Km [42].

Estas dos mejoras no resultan suficiente en casos en los que el entorno donde se ha instalado el nodo sea hostil, debido a la orografía, o porque no sea posible desplegar todos los nodos que un operador desearía, por causas económica, sociales u otros tipos de factores analizados con anterioridad.

Por todo esto, hay que seguir buscando soluciones. Una solución viable es la utilización de terminales de usuarios para que funcionen como nodo intermedio entre la red y el usuario final.

#### 6.2 CONSIDERACIONES GENERALES

A continuación se describen las consideraciones necesarias que debe cumplir la solución ideal para la extensión y mejora de la cobertura en un entorno rural.

Uno de los requisitos indispensables es que uno de los terminales disponga de cobertura de la red móvil LTE. Este terminal se comportará como un terminal repetidor o un punto de acceso para el resto de terminales que no pueden disponer de cobertura directa de la red móvil y se encuentren en el área de cobertura de este terminal repetidor. Los terminales sin cobertura deben conocer la existencia del terminal repetidor y poder conectarse a él. Para ello será necesario que exista una primera fase de descubrimiento, para seguidamente poder configurar la conexión y comenzar con la transmisión de los datos de los usuarios.

La comunicación entre terminales debe tener un alcance suficiente, hay que tener en cuenta que al encontrarnos en un entorno montañoso y rural, la dispersión de los terminales móviles será alta.

### 6.3 SOLUCIÓN BASADA EN NODO LTE Y TERMINAL INTERMEDIO.

Existen numerosas soluciones para la conexión entre dos o más dispositivos, muchas de ellas ya se encuentran implementadas en los terminales móviles. Tanto las tecnologías D2D, como las que se están desarrollando e investigando, están principalmente enfocadas a una mejora de la capacidad y velocidad de la red, dejando de lado la posibilidad de utilizar los terminales como una solución para la extensión de la cobertura [43] y [44].

Tecnología	D2D LTE	WiFi Direct	NFC	ZigBee	Bluetooth	UWB	Femto/pico/relay
<b>Estándar</b>	3GPP LTE-A	802.11	ISO 13157	802.1504	Bluetooth SIG	802.1503a	3GPP (Release 9, 10, 11)
<b>Frecuencia</b>	Banda con licencia LTE	2.4, 5 GHz	13.56 MHz	868/915 MHz, 2.4 GHz	2.4 GHz	3.1-10.6 GHz	Banda con licencia LTE
<b>Distancia máxima</b>	1000 m	200 m	0.2 m	10-100 m	10-100 m	10 m	1-2Km
<b>Throughput máximo</b>	1 Gb/s	500 Mb/s	424 kb/s	250 kb/s	24 Mb/s	480 Mb/s	100-500 Mb/s
<b>Aplicaciones</b>	Descarga de tráfico, Seguridad pública, Repetidores móviles	Conexiones dispositivos, gaming, compartir conexión	Pagos sin contacto, conexiones WiFi y bluetooth	Entretenimiento del hogar y control medioambiental	Conexión dispositivos y periféricos	Wireless USB, Video en alta definición	Mejora de la cobertura y duración de la batería. Ampliación de capacidad.
<b>Infraestructura</b>	Transferencia directa de datos en una banda con licencia	Transferencia directa de datos en una banda sin licencia					Transferencia de datos a través de un nodo (Femto/pico/relay) en una banda con licencia
<b>Costes</b>	<b>CAPEX:</b> Sin coste, los usuarios utilizan sus terminales y la red existente.	<b>CAPEX:</b> Sin coste, los usuarios utilizan sus terminales y la red existente.					<b>CAPEX:</b> Coste e instalación de los equipos.
	<b>OPEX:</b> Costes mínimos en termino de uso de batería.	<b>OPEX:</b> Costes mínimos en termino de uso de batería.					<b>OPEX:</b> Electricidad, alquiler emplazamiento y backhaul.

Tabla 6.1 Comparativa tecnologías

De las opciones existentes en la **Tabla 6.1** solo hay dos opciones que en un primer momento pueden ser viables para el enlace entre terminales, WiFi Direct y LTE. La opción de las femtocelda o relay ya quedó descartada por el coste que supondría y la dificultad que podría tener su instalación y mantenimiento en determinados lugares. El resto de opciones son descartadas debido a su limitado alcance.

WiFi Direct se trata de una tecnología que permite que varios dispositivos WiFi se conecten entre sí sin necesidad de un punto de acceso intermedio. Está basado en los mismos estándares que el WiFi [46], únicamente incrusta un punto de acceso en forma de software en el terminal. El programa de certificación en WiFi Direct está desarrollado y administrado por la WiFi Alliance [47], un grupo industrial que desarrolla el suite de estándares fundamentales de la certificación WiFi CERTIFIED y que es dueño de la marca "WiFi".

Dentro de la opción de LTE se descarta el LTE Direct. Se trata de una solución propietaria, por lo que no ha sido posible encontrar información detallada de su funcionamiento. De todas maneras, LTE Direct como se analizó en el apartado 4.1.2, no está enfocado a la extensión o mejora de la cobertura.

Para poder realizar una comparación entre las posibles soluciones, se han normalizado los elementos, los enlaces existentes y las principales fases necesarias para la comunicación.

Los elementos que pueden existir son tres: eNodeB, UE\_R y UE.

- **eNodeB:** Nodo LTE existente en la zona. Ofrece una zona de cobertura LTE limitada y será el nodo donante.
- **User Equipment Relay o UE Repetidor (UE\_R):** Terminal de usuario con funciones añadidas para poder llevar a cabo una extensión de la cobertura. Se encuentra dentro de la zona de cobertura del eNodeB donante y crea una zona de cobertura extendida.
- **User Equipment (UE):** Terminal de usuario que se encuentra sin cobertura directa de un eNodeB.

Los enlaces existentes son dos: el enlace principal backhaul y el enlace de acceso.

- **Enlace principal o backhaul (Uu):** Es el enlace por el que se transmiten las comunicaciones entre el eNodeB y el UE\_R. Es un enlace bidireccional y está controlado por la red del operador móvil.

- **Enlace acceso (Uu\_R):** Es el enlace por el que se transmiten las comunicaciones entre el UE y el UE\_R. Es un enlace bidireccional, gestionado por los terminales.



Tabla 6.2 Elementos Normalizados

En todos los casos, para que se pueda transmitir información, serán necesarias una serie de fases o procesos que serán comunes en todas las soluciones. En primer lugar tendrá que existir una fase de descubrimiento entre el terminal con cobertura de red y el terminal que no dispone de cobertura, para este proceso será necesario que los terminales puedan descubrirse sin la intervención de la red móvil. El siguiente paso es la fase de negociación donde los terminales negociaran entre sí y con la red móvil la configuración necesaria para poder establecer las portadoras que transportarán. Por último, en la fase de comunicación una vez que están establecidas las portadoras se podrá comenzar con el transporte de los datos de los usuarios.

### 6.3.1 TERMINAL INTERMEDIO LTE

Son numerosos los problemas que se deben resolver al introducir un terminal LTE con doble funcionalidad de repetidor y de UE. El primer problema es buscar un método para que los UE puedan descubrirse entre sí, manteniendo un consumo bajo de batería de los terminales, no es posible estar constantemente

transmitiendo o recibiendo. El segundo es conseguir mantener la conexión con unos niveles de calidad suficientes para que la transmisión pueda llevarse a cabo. Otro problema es la asignación que debe llevar a cabo el eNodeB para permitir este tipo de transmisiones. A lo largo de este apartado se intentará dar solución a todos estos problemas.

El terminal intermedio LTE se comportará como un repetidor de capa 2, el repetidor no creará señales de sincronización propias ni creará una nueva celda, lo que implicaría realizar un diseño más complejo, como se analizó en el apartado 4.1.1. En la **Figura 6.1** se puede ver los protocolos que se utilizarán en el plano de control, en la **Figura 6.2** el plano de usuario.

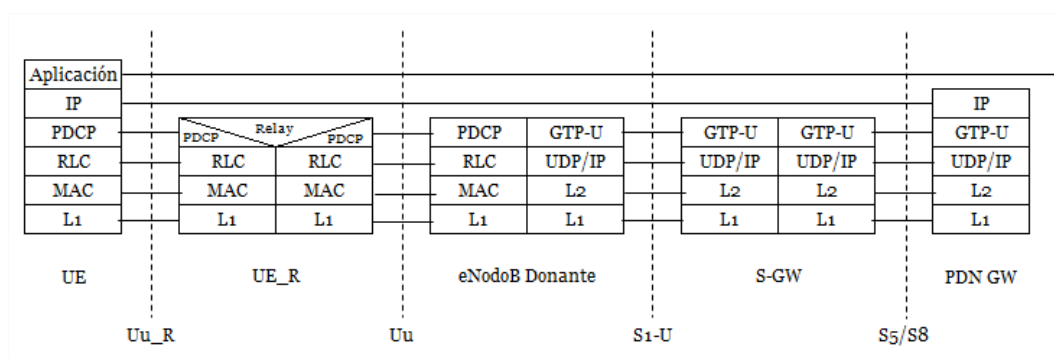


Figura 6.1 Plano de Usuario

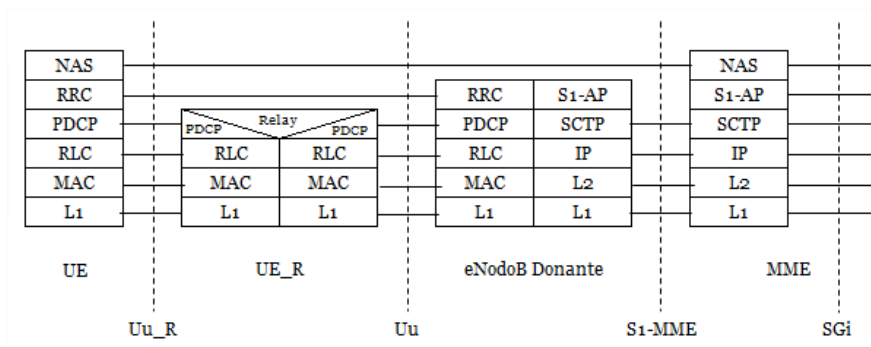


Figura 6.2 Plano de Control

La **Figura 6.3** refleja el diagrama de flujo que seguirá un UE cuando pierda cobertura y realice la búsqueda y conexión con otro UE. En él se encuentran reflejadas las tres fases que se llevarán a cabo.

La fase de descubrimiento se ha creado desde cero, se aprovechan las señales de sincronización que existen en LTE para su un uso diferente en esta fase,

sin que por ello se produzca una interferencia en el normal funcionamiento del resto de la red LTE.

Para la fase de formación de la conexión y la fase de comunicación se utilizan los estándares existentes relativos a repetidores en LTE, realizando pequeñas modificaciones.

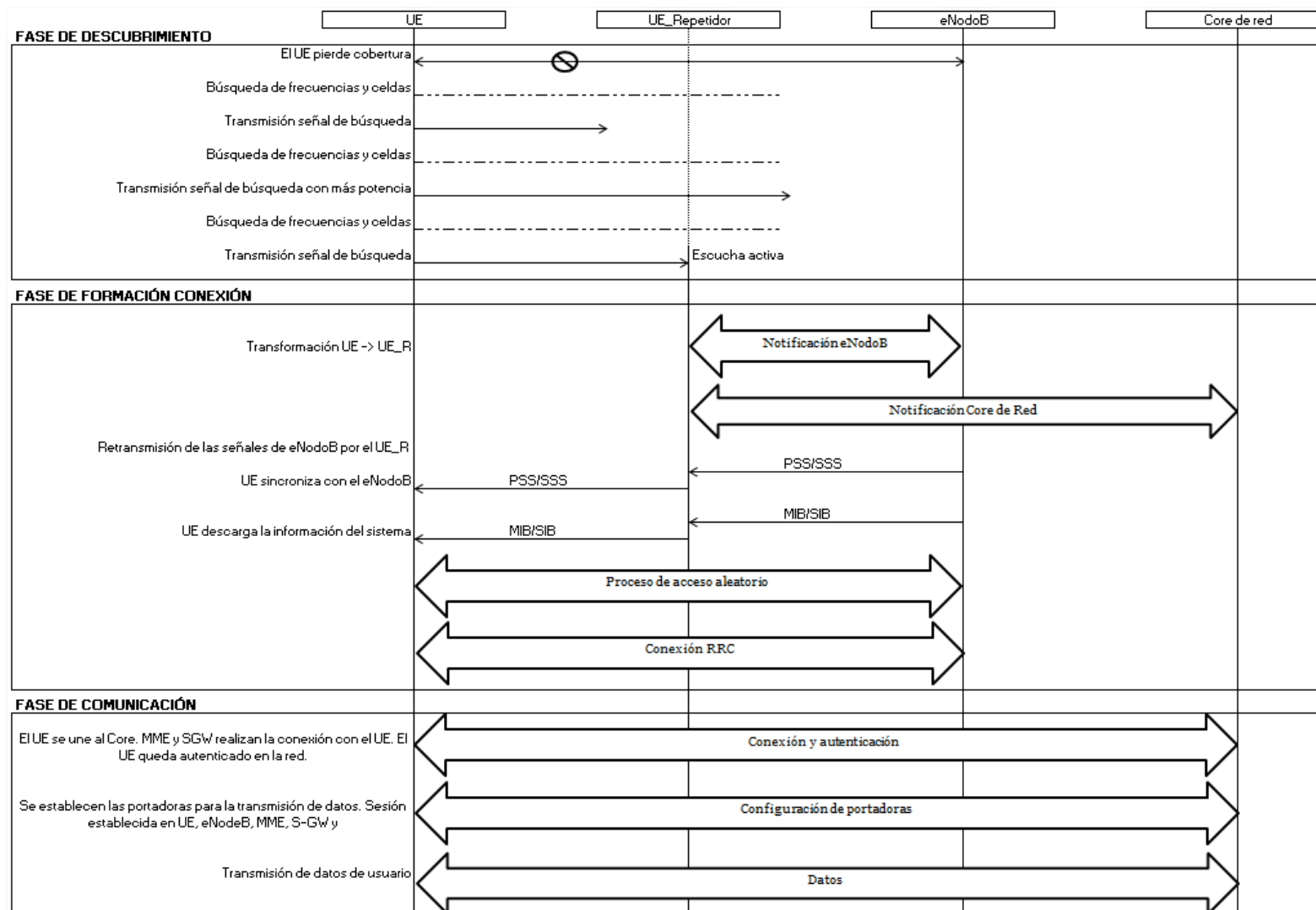


Figura 6.3 Diagrama de flujo LTE intermedio



#### 6.3.1.1 FASE DE DESCUBRIMIENTO

En la fase de descubrimiento se llevará a cabo el proceso en el cual el terminal sin cobertura es capaz de localizar un terminal con cobertura y poder conectar con él.

El 3GPP utiliza dos modelos diferentes para abordar los problemas de búsqueda de terminales

- **Modelo A: “Estoy aquí”**

Existen dos roles en este modelo:

- UE transmisor: el UE como notificador o anunciador. El UE transmitiría cierta información que usarían el resto de UE con cobertura para poder transformarse en un UE\_R.
- UE monitorizador: los UE con cobertura estaría monitorizando los mensajes que pueden enviar los terminales sin cobertura.

En este modelo el UE transmisor enviará ciertos mensajes predefinidos en unos intervalos y el UE monitorizador que esté interesado podrá procesar esos mensajes en los intervalos predefinidos.

- **Modelo B: “¿Hay alguien ahí?”**

Existen dos roles en este modelo:

- UE descubridor: el UE transmite una solicitud que contiene cierta información sobre lo que está interesado en encontrar.
- UE descubierto: el UE que recibe la solicitud puede responder con alguna información que ayude al descubridor.

Para los requisitos necesarios, el modelo A sería el apropiado. El modelo B está orientado para la búsqueda de información dentro de grupos, ya que varios terminales te podrían ayudar a encontrar a un terminal o a recibir la información que estás buscando. Por el contrario el modelo A se puede utilizar de una manera más directa para el propósito que se busca, el terminal que pierde cobertura es el encargado de enviar una señal de petición de ayuda para que un UE con cobertura se pueda transformar en un UE\_R y dotar de cobertura el UE.

Lo ideal sería que el UE\_R estuviera constantemente transmitiendo las señales sincronización y broadcast y funcionando en modo repetidor constantemente. Pero al ser un terminal móvil y tener una batería limitada, esta situación no es posible y es necesario buscar otras opciones. Por ello se descartaron

las soluciones en la que el UE\_R crea su propio identificador de celda y transmite sus propias señales de referencia, canales de control, de sincronización y broadcast de información de sistema, ya que esto implicaría una carga de procesador muy alta para el UE.

Por esto es necesario que cuando el UE pierda la cobertura de un eNodeB sea capaz de comunicarse con otro UE, que si disponga de cobertura de un eNodeB, para que este terminal se convierta en un terminal repetidor, UE\_R. De esta manera solo realiza las funciones de repetidor si lo necesita otro terminal porque haya perdido la cobertura.

Para que un UE se convierta en un UE\_R es necesario que tenga una escucha activa en ciertos periodos, para poder detectar la señal de los terminales sin cobertura.

Un parte indispensable para que se produzca la transformación en UE\_R es que la red lo permita. Para ello el eNodeB puede actuar de dos maneras diferentes en función de la intervención que pueda llevar a cabo en las conexiones UE-UE.

- **Descubrimiento bajo control estricto del eNB.**
  - El eNB es el encargado de enviar la orden de transmitir y recibir a los terminales repetidores.
  - Las medidas son reportadas al eNB.
  - Los terminales tienen que estar en modo conectado.
  - Invisible para el resto de UEs.
- **Descubrimiento bajo control laxo del eNB.**
  - eNB envía en modo broadcast los recursos que pueden ser utilizados.
  - Cada UE realiza las conexiones necesarias con los UE vecinos.
  - Los terminales pueden estar en modo idle.
  - Baja señalización.

Con el objetivo de no sobrecargar la red y los canales de señalización y de que la conexión se pueda llevar a cabo cuando alguno de los terminales no se encuentre conectado a la red, se ha escogido la segunda opción. La mayor parte del tiempo los terminales móviles se encuentran en modo idle, por lo que es más probable que pueda estar en un fase de escucha activa cuando un UE pierda cobertura.

En este caso el eNB únicamente indicará los recursos que pueden utilizar los terminales para el modo que se puede llamar: “búsqueda de terminales sin cobertura” y en qué momentos este modo estará activo o no.

Cuando un terminal tengo activada la “búsqueda de terminales sin cobertura” cada terminal se encargará de realizar una escucha activa para detectar a otros terminales sin cobertura y realizar las configuraciones necesarias para actuar como un repetidor, sin intervención del eNB.

#### 6.3.1.1.1 ¿CÓMO DESCUBRIR UES Y SER DESCUBIERTO?

Una vez que un terminal pierde cobertura, en circunstancias normales comenzaría a buscar de forma periódica las señales de sincronización primaria PSS, y secundaria SSS, en el canal de broadcast BCH, Estas son las señales que el terminal necesita para poder comenzar con el Random Access Process. Si encuentra alguna de estas señales se conectará a ese eNB, habrá seguido el proceso normal de establecimiento de una conexión. En caso de no encontrar señales de sincronización de un eNB, el terminal comenzará la búsqueda de un terminal repetidor.

La solución propuesta es que se produzca un intercambio de señales entre el terminal que tienen cobertura y el terminal que la están buscando. El UE sin cobertura tendrá que transmitir algún tipo de señal para que el resto conozcan su situación. Cuando esta señal sea detectada por un UE que se encuentre con cobertura del eNodeB y tenga activado el servicio de “búsqueda de terminales sin cobertura” podrá transformarse en el terminal UE\_R y comenzar con la siguiente fase de establecimiento de la conexión. De esta manera los UE con cobertura no están constante mente actuando como UE\_R, retransmitiendo las señales del eNB.

#### 6.3.1.1.2 MODO “BÚSQUEDA DE TERMINALES SIN COBERTURA”

Para poder utilizar el modo “búsqueda de terminales sin cobertura” es necesario que los terminales estén funcionando en un modo especial que está recogido por el 3GPP [12] [24], Multicast Broadcast Single Frequency Network (MBSFN).

El MBSFN originalmente ha sido diseñado para proporciona funciones de transporte para el envío de la misma información a todos los usuarios en una celda (broadcast) o para un conjunto dado de usuarios, abonados, en una celda (multicast) usando un subconjunto de los recursos de radio. En nuestro caso aprovecharemos esta funcionalidad con otro fin.

Para la activación de este método es necesario que todos los terminales de la zona que vayan a poder actuar como UE\_R reciban la información de configuración del MBSFN en el SIB tipo 2, en este bloque también se encuentra la

información relativa a los canales comunes y compartidos en LTE. También es necesario recibir el SIB tipo 13, que contiene la información necesaria para adquirir la información de control del Multimedia Broadcast Multicast Service (MBMS) asociado con una o más áreas MBSFN. Será necesario realizar una modificación en las características del SIB tipo 13 para que pueda informar de las zonas de escucha activa que deben tener los UEs.

El UE sin cobertura y que durante un periodo de tiempo no ha encontrado un eNodeB utilizando los mecanismos habituales, comenzará la búsqueda de un UE\_R transmitiendo una señal de búsqueda (SB). Alternará periodos de transmisión de la señal SB con periodos de escucha de señales de broadcast que podrán provenir directamente de un eNB o repetidas a través de un UE\_R, siendo transparente para el UE sin cobertura.

Los terminales que tengan activado MBMS esperan recibir las señales de referencia únicamente en el primer y segundo símbolo OFDM, mientras que el resto de la subtrama puede encontrarse vacía, lo que en este caso se utilizará para la escucha activa de señales de búsqueda de terminales sin cobertura. Solo los terminales que se encuentren en modo idle podrán llevar a cabo la búsqueda, los terminales que se encuentren en modo dedicado dedicarán todos los recursos a su propia comunicación quedando fuera de este proceso.

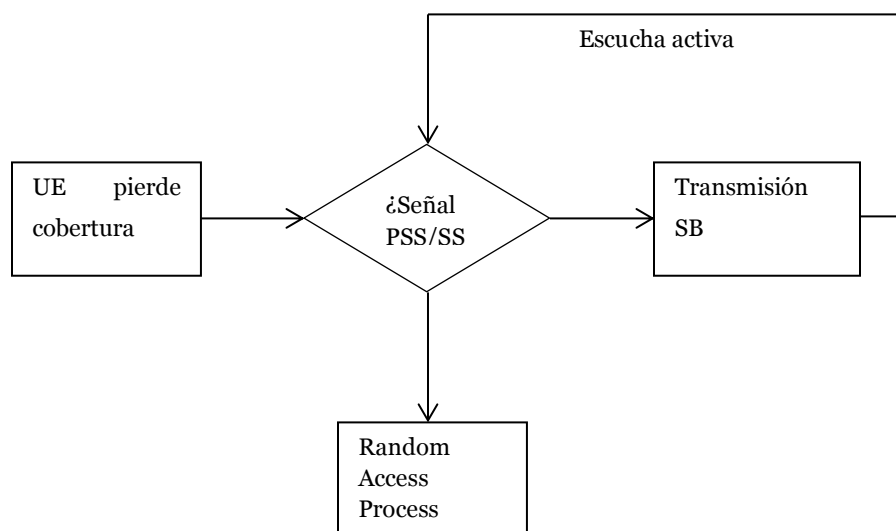


Figura 6.4 Proceso de búsqueda UE sin cobertura

Cuando un UE con cobertura detecte una señal SB transformará su funcionamiento en un UE\_R. Esta transformación implica que comience a

retransmitir las señales de broadcast y control del eNB, como si de un repetidor se tratara. Existe la posibilidad de que varios UEs se transformen en UE\_R, esto no resultaría un problema ya que el UE sin cobertura se conectará con el UE\_R que mejores condiciones radio le proporcione, como ocurre con cualquier conexión con un eNB. Cuando un UE\_R esté en funcionamiento y en un periodo de tiempo no reciba ninguna señal de un UE volverá a su estado normal de funcionamiento.

No todas las celdas de un eNodeB tienen que tener activada la “búsqueda de terminales sin cobertura”, en el ejemplo de la **Figura 6.5** el sector que estamos estudiando, el amarillo, si tendría activada la funcionalidad. El sector verde no tendría sentido activar esta funcionalidad ya que cobertura objetivo de este sector es la población de Rascafría, donde no existirán problemas de falta de cobertura. Para el sector rojo sería necesario realizar un estudio para ver posibles huecos de cobertura y zonas de interés.



Figura 6.5 Solo el sector amarillo tendría la “búsqueda de terminales sin cobertura” activada

#### 6.3.1.1.3 SEÑAL DE BÚSQUEDA SB

Para la señal de búsqueda he preferido aprovechar la estructura que tienen las señales PSS y SSS ya que son señales fácilmente reconocibles para los UEs y no son difíciles de generar. También he elegido esta opción con el fin de realizar el menor número de modificaciones en los protocolo de LTE.

Para evitar que los terminales detecten la SB y crean que se trata de una señal de un eNB, es necesario reservan unos rangos de PCIs para la utilización como SB.

En zonas urbanas o con una gran densidad de nodos, el reservar PCIs para la extensión de cobertura puede suponer un problema ya que al tener menos PCIs la distancia de reuso disminuye con los consiguientes problemas de interferencias entre PCIs. En el caso que se está estudiando este problema no existe ya que está enfocado a zonas con una densidad de nodos baja y con los 504 PCIs existentes no es un problema.

El PCI está compuesto por las señales PSS y SSS. La señal PSS, tiene 3 valores posibles y la señal SSS tiene 168 secuencias posibles [47].

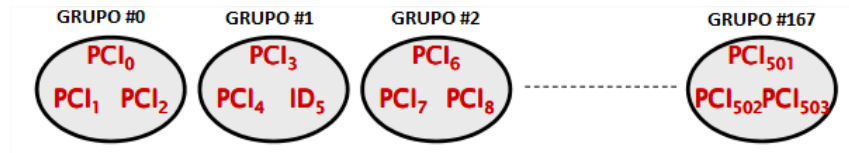


Figura 6.6 Agrupación de PCI

De los 168 grupos que se pueden ver en la **Figura 6.6**, en un primer momento solo sería necesario el reservar uno. Con un grupo se dispondrían de 3 PCIs que podrían ser asociados a distintos UE\_R.

#### 6.3.1.2 FORMACIÓN DE LA CONEXIÓN

Cuando el UE recibe la señal de un UE sin cobertura comienza la transformación de UE a UE\_R. Cuando se produce esta transformación es necesario notificarlo al Core de Red para ello el terminal debe pasar de estado *idle* al estado *conectado*. Se realizarán una serie de procedimientos similares a los que realiza un UE cuando conecta por primera vez a la red móvil.

En la primera fase el UE\_R al estar ya unido a la Red de Acceso, E-UTRAN, y Red de Core, EPC, únicamente debe recibir los parámetros de configuración inicial de la red de operación y mantenimiento (O&M). Después de completar esta operación el UE\_R volverá al estado *idle*, como haría un UE y continuará con la segunda fase, como se muestra en la **Figura 6.7**.

En la segunda fase, como se puede ver en la **Figura 6.7**, el UE\_R reconectará con el eNodoB donante, si se encuentra en la lista adquirida en la fase uno, si el nodo al que estaba conectado no se encuentra en la lista y no existe otro nodo que pueda darle servicio de los de la lista, el UE\_R volvería a su modo de funcionamiento normal como UE. El procedimiento es el mismo que el de un UE, con la excepción de que las funcionalidades de S-GW/P-GW son realizadas por el eNodoB donante. El MME indica al eNodoB donante que el UE\_R está autorizado para funcionar como un repetidor.

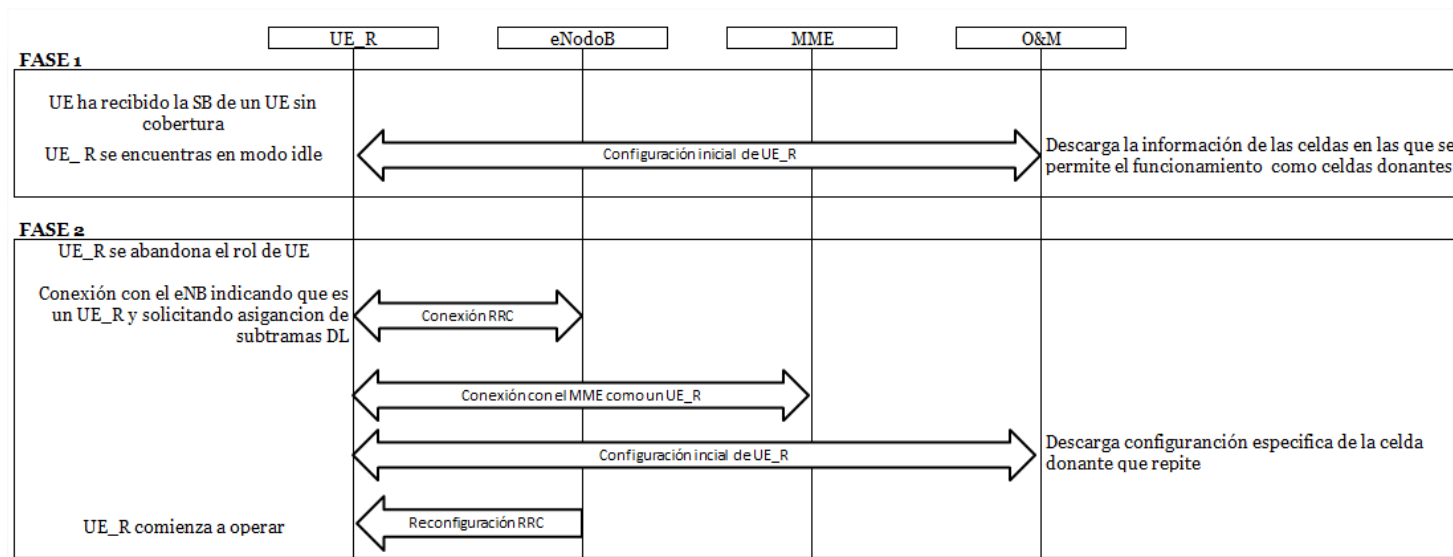


Figura 6.7 Formación de la conexión



Después de toda la configuración el enlace de backhaul está listo para comenzar la transmisión, el enlace de acceso puede comenzar a retransmitir las señales de eNodeB donante.

Para el downlink el UE\_R retransmitirá todas las señales que reciba del enlace de backhaul al enlace de acceso. Para el uplink el UE\_R debe ser capaz de combinar el tráfico propio del terminal con el tráfico que puede recibir del enlace de acceso.

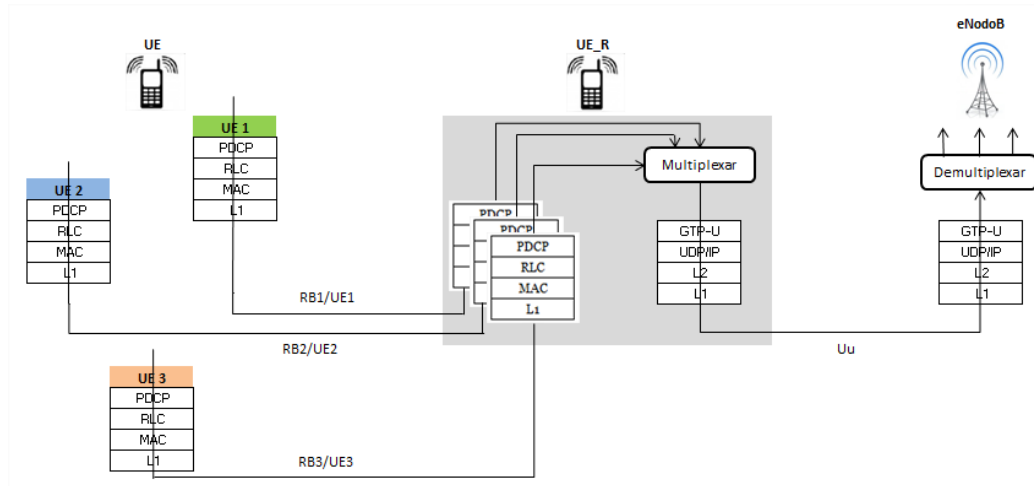


Figura 6.8 Multiplexación usuarios

Se ha elegido para el intercambio de paquetes entre los dos interfaces realizarlo a nivel de PDCP. Los paquetes se encuentran cifrados y su integridad está protegida en la capa PDCP usando claves que solo son conocidas por el cliente final y el eNB. De esta manera ni el UE\_R ni otros terminales pueden descifrar estos paquetes. Otra ventaja es que el UE\_R puede intervenir a fondo en el proceso PDCP PDUs en la capa RLC para concatenar o segmentar paquetes en función de la calidad del enlace físico.

#### 6.3.1.2.1 ENLACE DE BACKHAUL Y ACCESO

Tanto para el enlace de backhaul como para el enlace de acceso se va a utilizar la misma frecuencia, el UE\_R se comporta como un repetidor en banda, por ello es necesario un mecanismo para separar la actividad de ambos enlaces [47].

La solución pasa por separar en el dominio del tiempo ambos enlaces, con un suficiente aislamiento para que no se produzcan interferencias. Es necesario

asegurar que no se transmiten datos en el enlace de acceso al mismo tiempo que se reciben datos en el enlace de backhaul. También es necesario que exista una coordinación entre las transmisiones que se realizan entre los UEs conectados al eNodeB y el UE\_R.

Una forma de realizar la separación en el dominio temporal es mediante el uso de "espacios en blanco" en algunas subtramas del enlace de acceso. Cuando el UE\_R no está transmitiendo a los UEs, puede estar recibiendo datos del eNB, lo que quiere decir que se crean huecos en las transmisiones entre el UE\_R y los UEs. Durante estos huecos los UEs no esperan recibir transmisiones del enlace descendente del UE\_R. Por otro lado, para el enlace ascendente entre el UE\_R y el eNB la solución es más sencilla, ya que únicamente es necesario no permitir las transmisiones en algunas subtramas entre el UE y el UE\_R. Esto puede ser implementado mediante el planificador del UE\_R sin que se produzcan cambios en las especificaciones.

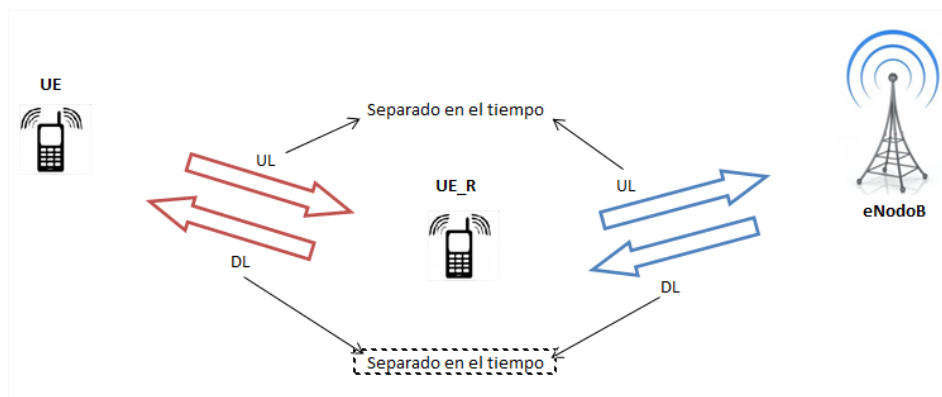


Figura 6.9 Separación temporal enlaces

El uso de "espacios en blanco" en el enlace descendente de acceso no es posible por las especificaciones del 3GPP. Aunque un terminal release-10 puede hacer frente a subtramas en blanco, los terminales de versiones anteriores siempre esperan señales de referencia en todas las subtramas del enlace descendente. Por lo tanto, para que también se pueda utilizar este mecanismo con terminales anteriores a release-10, es necesario adaptar otros métodos para este fin.

Afortunadamente, desde las primeras releases de LTE se han incluido una configuración que puede solventar los problemas de los "espacios en blanco", Multicast Broadcast Single Frequency Network (MBSFN).

En tramas MBSFN, los terminales esperan señales de referencia únicamente en el primer y segundo símbolo OFDM, mientras que el resto de la subtrama puede

encontrarse vacía. Mediante las configuraciones de algunas de las subtramas del enlace de acceso como subtramas MBSFN, el UE\_R puede dejar de transmitir en la última parte de estas subtramas y recibir transmisiones del eNodeB. El espacio disponible durante el cual el UE\_R puede recibir transmisiones del eNodeB es más corto que la duración completa de la subtrama.

Al utilizar MBSFN una señal importante que se ve afectada es el PDCCH. El eNB necesita enviar la señal PDCCH a todos los terminales bajo su cobertura, pero no puede recibir el PDCCH del UE\_R. Para evitar estos problemas el 3GPP definió un nuevo canal de control L1/L2 llamado R-PDCCH, que utilizará algunos recursos del canal PDSCH. Como los primeros símbolos OFDM no están disponibles para las señales de referencia del enlace de backhaul, entre el eNodeB y el UE\_R, no se puede utilizar el canal PDCCH, por ello es necesario utilizar el R-PDCCH.

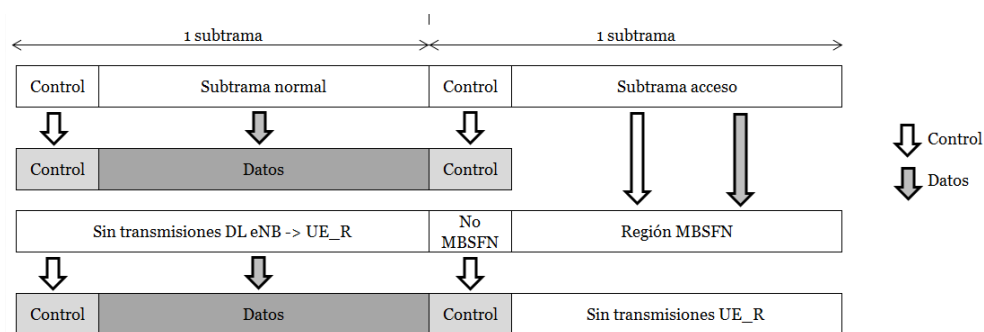


Figura 6.10 TDM entre acceso y backhaul con MBSFN

#### 6.3.1.2.2 R-PDCCH

El nuevo canal de control se transmite fuera de la región en la que se transmitía el antiguo canal PDCCH [47] y [48]. Para el enlace de backhaul, entre el eNodeB y el UE\_R, se utiliza un conjunto configurado semi-estáticamente de RB. Esto significa que el R-PDCCH utiliza recursos de los canales de datos y es multiplexado en tiempo y frecuencia con el PDSCH.

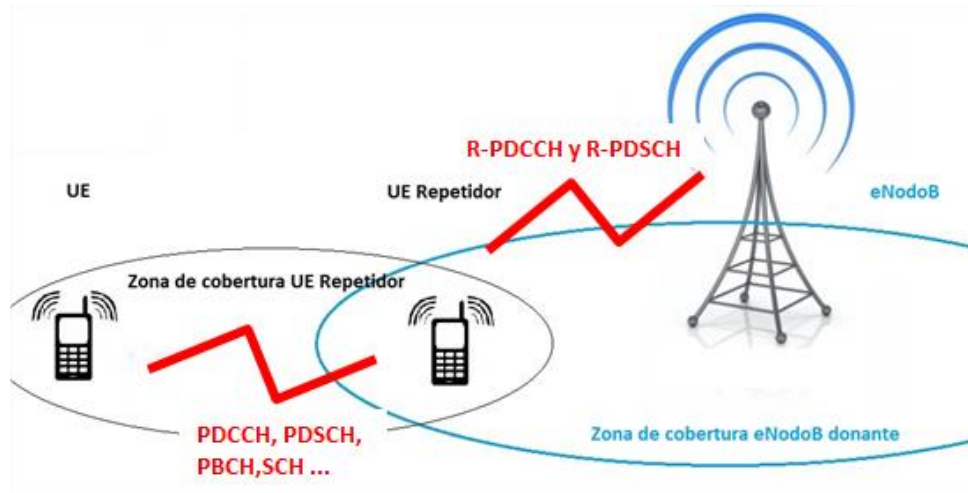


Figura 6.11 Canales PDCCH y R-PDCCH

Por lo tanto, el PDCCH *legacy* se ve menos afectado por la introducción de R-PDCCH. Sin embargo, esto solo es válido para un escenario en el que ambos enlaces utilicen la misma banda de frecuencia, si se utilizasen frecuencias diferentes el problema sería más complicado. El uso de R-PDCCH se considera una extensión del PDCCH para utilizar en escenarios excepcionales como este caso, pero no un remplazo del PDCCH. En general, el R-PDCCH se encarga de transmitir el DCI para terminales repetidores, que incluye las asignaciones de recursos para un UE o grupo de UE. El eNodeB puede enviar varios DCIs o PDCCHs en cada subtrama.

#### 6.3.1.2.3 SINCRONIZACIÓN DE LOS ENLACES

Para el UE\_R tiene que reservarse unos tiempos de conmutación entre la Tx/Rx y entre la Rx/Tx en el enlace de backhaul. También el UE\_R debe asegurar que las subtramas descendentes del enlace de acceso están alineadas con las subtramas descendentes del enlace de backhaul. Para ello, el diseño de la sincronización de las subtramas del UE\_R DL/UL debe maximizar el número de símbolos OFDM disponibles para la transmisión en los enlaces [48] [47].

Para las transmisiones del enlace de backhaul, el UE\_R actúa como un UE para el eNB. En las tramas normales de sincronismo del UE\_R DL, los retardos que se producen entre las tramas del UE\_R y el eNB por la propagación de la señal son las que se pueden ver en la **Figura 6.12**.

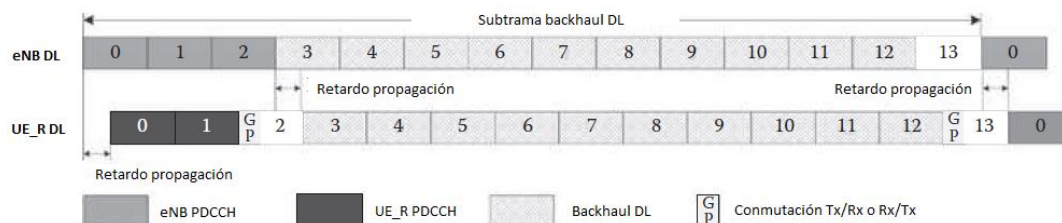


Figura 6.12 Retardos de propagación [48]

Cuando el UE\_R realiza el cambio de Tx/Rx o Rx/Tx, dos símbolos OFDM, el #2 y #13, no se pueden usar para el enlace de backhaul descendente. Esto es claramente ineficiente, por ello en release-10 se ha introducido un retardo previo, lo que provoca únicamente un solo símbolo OFDM quede inutilizado para las dos conmutaciones Tx/Rx y Rx/Tx, como se puede ver en la **Figura 6.13**.

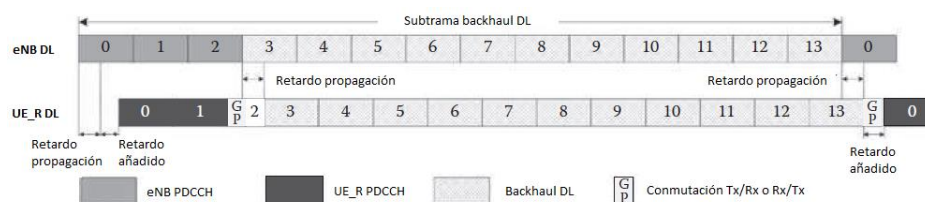


Figura 6.13 Retardo previo [48]

El retardo debe ser, al menos, igual al tiempo de conmutación del UE\_R. El símbolo #2 no está disponible durante el cambio Tx/Rx, no implica un gran problema ya que se usa para el canal PDCCH en el eNB, el número total de símbolos OFDM para la transmisión en el enlace de backhaul quedaría en once. El problema de esta solución es que solo funcionaría en FDD. En TDD, debe existir una alineación de las subtramas en el eNB y el UE\_R, el retardo fijo que se introducía en la anterior solución no es válido. La sincronización para el UE\_R DL está ilustrada en la **Figura 6.14**.



Figura 6.14 Alineación de subtramas [48]

Release-10 proporciona flexibilidad a la hora de configurar la sincronización del enlace descendente de backhaul en función de las características del enlace entre el eNB y el UE\_R. Existen tres configuraciones para el primer slot **Tabla 6.3** y dos para el segundo slot **Tabla 6.4** [47].

Configuración	Símbolo inicial DL	Símbolo final	Símbolos utilizados
0	1	6	6
1	2	6	5
2	3	6	4

Tabla 6.3 Primer slot

Configuración	Símbolo inicial DL	Símbolo final	Símbolos utilizados
0	0	6	7
1	0	5	7

Tabla 6.4 Segundo slot

Dependiendo de los diferentes tamaños de la región de control en las celdas donantes y del UE\_R, el eNB puede iniciar las transmisiones PDSCH al UE\_R en el segundo, tercero o cuarto símbolo OFDM en el enlace descendente de backhaul. Este inicio es semiestático y puede ser configurado.

Las transmisiones R-PDCCH destinadas al UE\_R siempre comienzan en una posición fija, el tercer símbolo. De esta manera se simplifica la estructura.

Para las transmisiones del UE\_R en el enlace de backhaul ascendente, es necesario un tiempo de conmutación entre Rx/Tx y Tx/Rx. En release 10 no es necesaria ninguna especificación adicional para soportar la sincronización de los enlaces de backhaul y acceso UL, como se ve en **Figura 6.15**

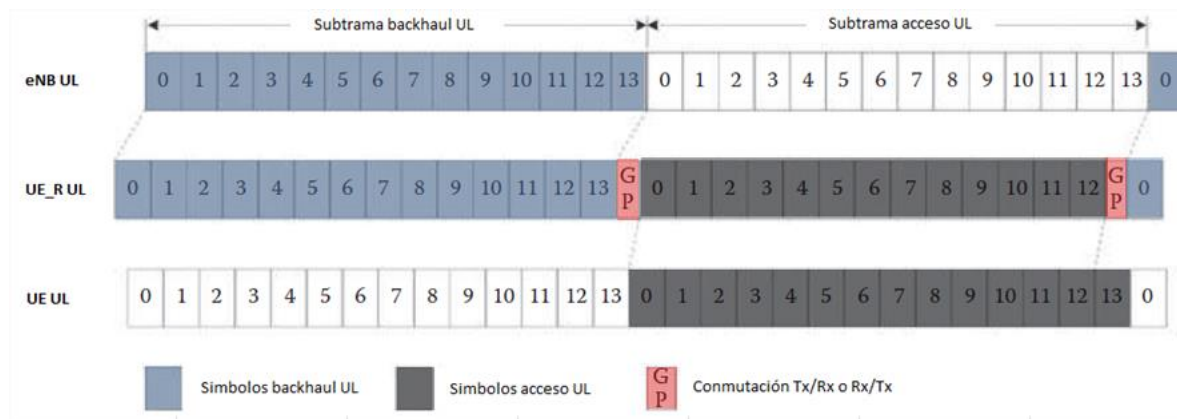


Figura 6.15 Enlaces de Backhaul y acceso UL [48]

Como se ve en la **Figura 6.15**, la frontera entre el enlace de acceso UL y el de backhaul UL está definida por un hueco fijo y el tiempo de conmutación del UE\_R Tx/Rx se soluciona prohibiendo la transmisión del símbolo #13 en la subtrama del enlace de backhaul UL. El resultado es que la transmisión del enlace de acceso del UE al UE\_R se retarda.

### 6.3.1.3 COMUNICACIÓN

Una vez que toda la configuración necesaria ha sido llevada a cabo, comienza la transmisión de los datos de usuario. El UE tiene acceso completo a toda la red móvil a través del UE\_R.

Lo primero que tendrá que realizar el UE es una vez que está conectado al eNB a través del UE\_R es realizar las conexiones con el Núcleo de Red. Realizará las conexiones y autenticaciones con el MME y S-GW.

El UE\_R tendrá una serie de interfaces con distintas entidades de la red como puede verse en la **Figura 6.16**.

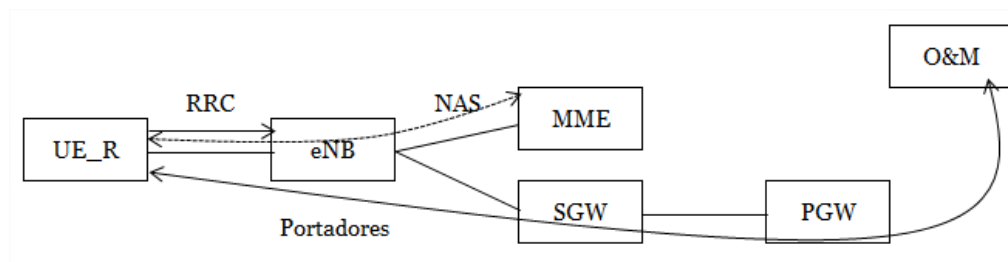


Figura 6.16 UE\_R como eNB

Una vez el terminal esté completamente registrado en la red podrá realizar la configuración de los servicios portadores (*bear*) que serán los que proporcionen el soporte de transmisión de los datos de usuario. Existen diferentes portadores que unen el UE con las diferentes entidades de la red móvil, como aparece en la **Figura 6.17**.

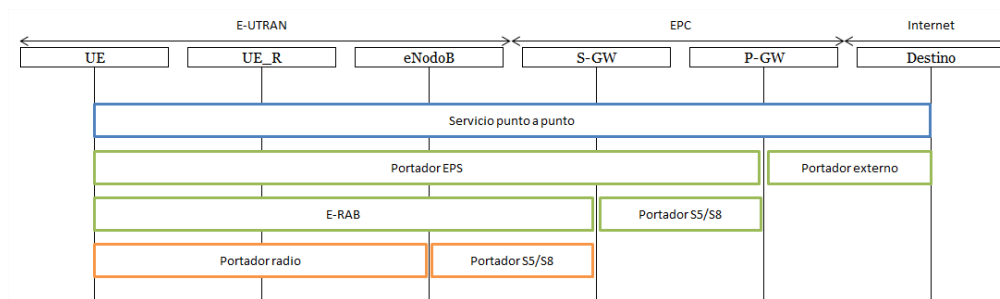


Figura 6.17 Arquitectura del servicio de portadores

### 6.3.2 TERMINAL INTERMEDIO WIFI

En este caso el enlace de backhaul mantendrá sus características, la transmisión entre el eNB y el UE\_R seguirá siendo LTE. En el enlace de acceso es donde se produce el cambio comparándolo con el anterior punto, ya que la conexión entre terminales se realizaría mediante WiFi Direct (IEEE 802.11 [46]), por lo que el UE\_R tendrá que trabajar con dos tecnologías diferentes.

En una red WiFi clásica, los clientes realizan las búsquedas de redes y se conectan con un punto de acceso. Cliente y punto de acceso tienen unas funciones definidas y no son intercambiables entre sí. Una novedad importante de WiFi Direct es que estas funciones pueden ser dinámicas, un dispositivo WiFi Direct tiene que implementar tanto el papel de cliente y el papel de punto de acceso.

Para que se logre establecer una comunicación, los dispositivos funcionan como una red P2P y tienen que ponerse de acuerdo sobre el papel que cada dispositivo va a asumir en el momento de la negociación. En nuestro caso el terminal que posea cobertura móvil será el terminal que funcione como punto de acceso.



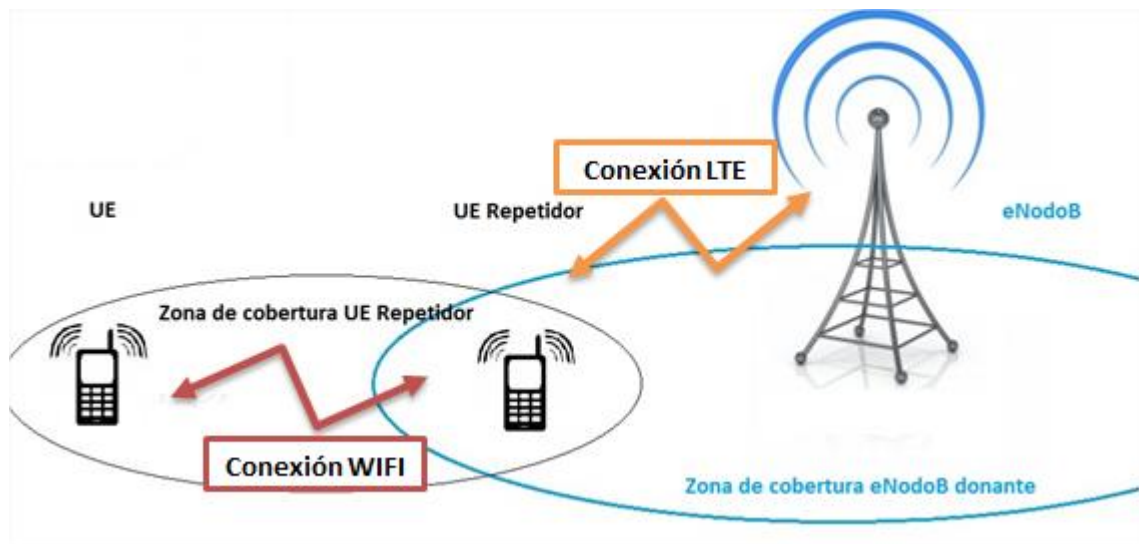


Figura 6.18 Enlaces WiFi y LTE

Existen varios estudios [49] [50] donde se utiliza WiFi Direct en unión con LTE, sobre la base de estos estudios se desarrolla este punto.

Para la utilización conjunta de estas dos tecnologías, la mayoría de los cambios que habría que llevar a cabo son implementables en los protocolos actuales.

En la **Figura 6.19** se puede ver el diagrama de flujo de lo que sería una conexión completa de un terminal intermedio LTE.

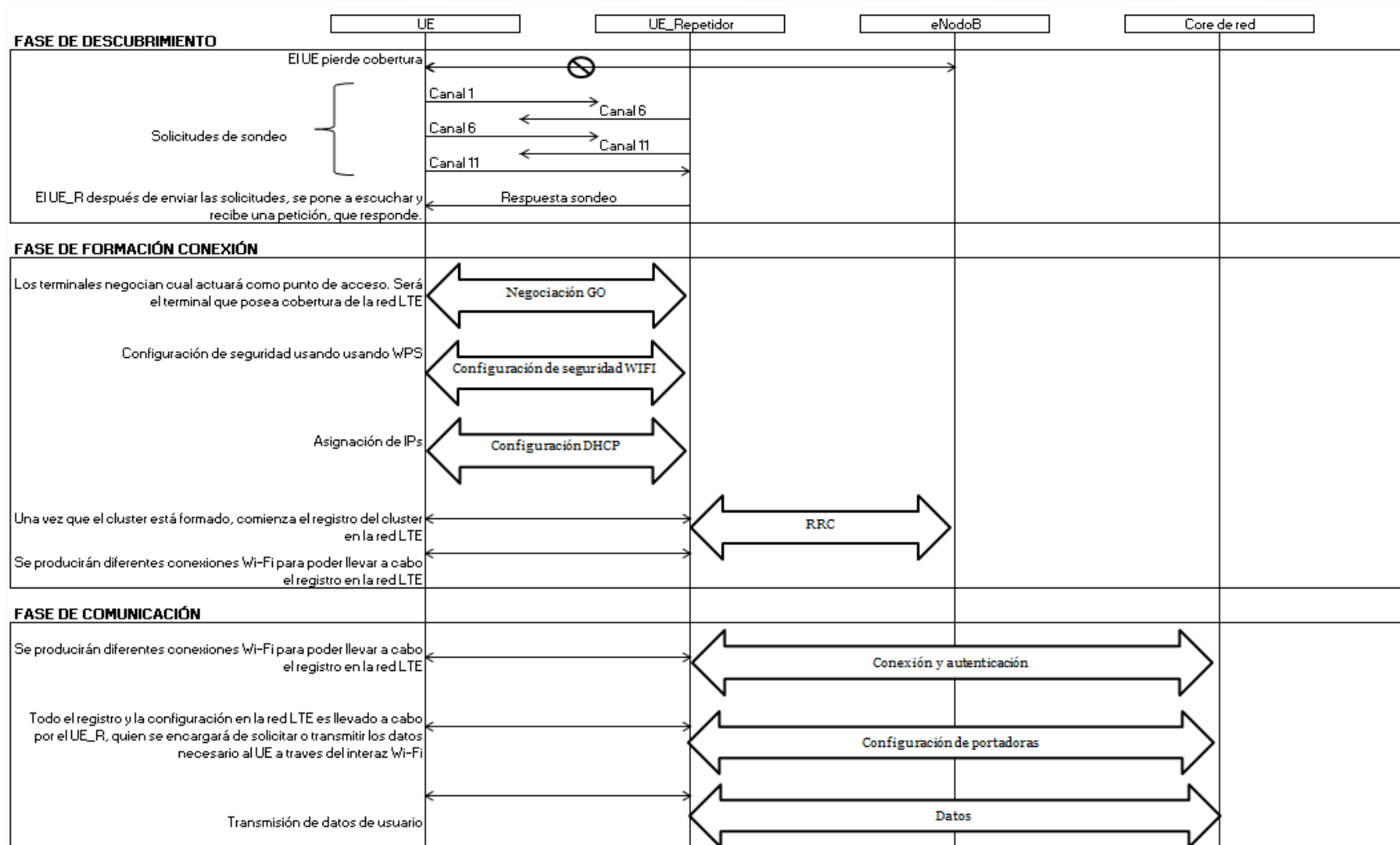


Figura 6.19 Diagrama de flujo WiFi intermedio

#### 6.3.2.1 DESCUBRIMIENTO

Para que un UE al perder cobertura pueda ser descubierto por otro UE con cobertura es necesario que ambos terminales tengan activo la conexión WiFi.

El terminal al perder cobertura comenzará a escanear los canales WiFi, en busca de la existencia de algún grupo, si no existe un grupo ya creado, comenzará el proceso de búsqueda.

Seleccionará uno de los canales sociales, es decir, los canales 1, 6 o 11 en la banda de 2,4 GHz, como su canal de escucha. Luego, alternará entre dos estados: un estado de búsqueda, en el que el dispositivo realizará la exploración activa mediante el envío de *Probe Request* en cada uno de los canales sociales; y un estado de escucha, en el que el dispositivo escuchará los *Probe Request* de otros terminales, si recibe alguno responderá con un *Probe Responses*.

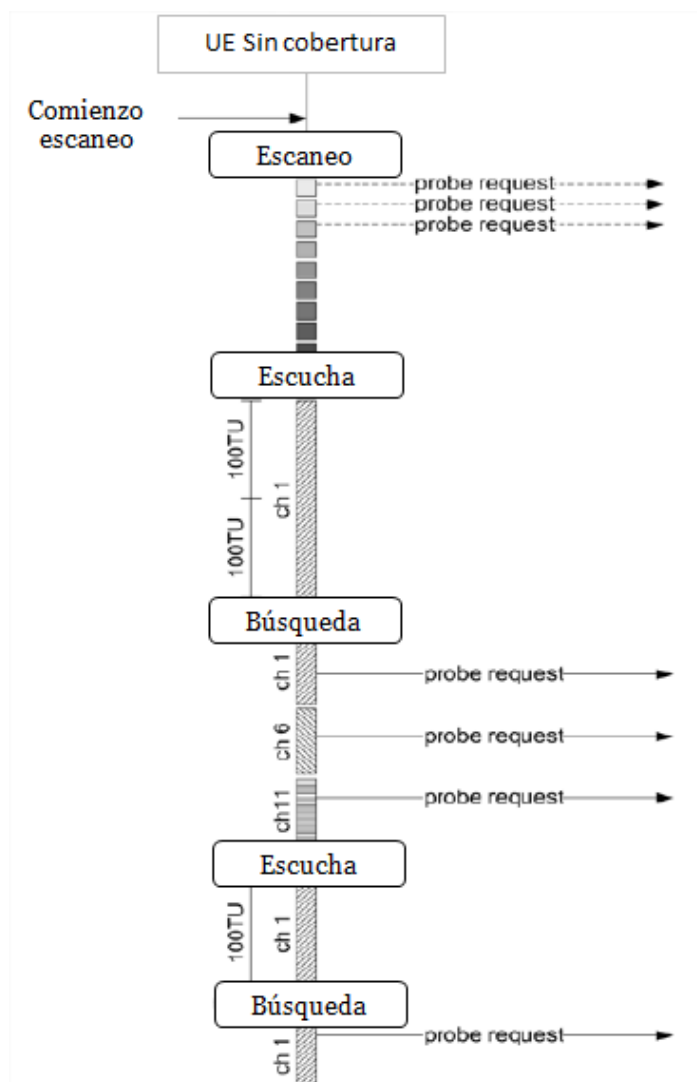


Figura 6.20 Fase de descubrimiento

Lo normal será que en la zona no existan otros grupos, por lo que el UE comenzará a enviar Probe Request y cuando un terminal con cobertura reciba estas señales enviará un *Probe Responses*, de esta manera ambos terminales se habrán descubierto y podrán seguir con la negociación.

#### 6.3.2.2 FORMACIÓN DE LA CONEXIÓN

Una vez que los dos terminales se han descubierto el uno al otro comienza la fase de negociación GO. Se implementa mediante lo que se conoce como un “apretón de mano a tres bandas” llamado negociación GO que consiste en 3 fases la Solicitud, Respuesta y confirmación, donde los dispositivos se tienen que poner de

acuerdo sobre cual actuará como punto de acceso y sobre el canal que van a utilizar. Wi-Fi Direct puede operar en las bandas de 2.4GHz y 5GHz, en este caso solo se utilizará la banda de 2.4GHz ya que puede proporcionar una mayor dispersión.

Para ponerse de acuerdo sobre el dispositivo que actuará como punto de acceso (llamado GO, Group Owner), en el algoritmo ambos terminales envían un parámetro numérico el *GO Intent* y el terminal con el mayor valor se convierte en el punto de acceso o GO. En este caso siempre el terminal con cobertura enviará el *GO Intent* con valor máximo, estando este valor máximo restringido a terminales con cobertura LTE. De esta manera únicamente podrán ser puntos de acceso los terminales con cobertura.

Una vez los roles de cada terminal están claros, comienza la configuración de seguridad usando *Wireless Protected Setup* (WPS). Cuando la configuración está completa el GO asigna IPs a los terminales utilizando el protocolo DHCP.

El GO necesita crear una serie de registros con los datos de los terminales LTE como por ejemplo el S-TMSI y una asociación LTE-WiFi

Una vez que la unión WiFi Direct entre los terminales está formada es necesario comenzar con el registro en la red LTE, el proceso consta de dos fases la notificación y la verificación. Para ello se crea un nuevo mensaje a nivel RRC que se envía al eNB, el cual responderá con información NAS donde se incluye la identidad EPS de todos los usuarios del cluster.

<b>Información de elementos</b>	
Identidad del cluster	Asignado por el eNB
Identidad del punto de acceso del cluster	S-TMSI
Identidad de los usuarios del cluster	S-TMSI del UE1 S-TMSI del UE2 ...
Causa de la petición	Conexión Inicial/Llegada/Salida
Información NAS	

Tabla 6.5 Información elementos RRC

Una vez establecida la conexión RRC el UE\_R y eNB continúan con los procesos de seguridad y verificación de la red LTE.

### 6.3.2.3 COMUNICACIÓN

Una vez que las conexiones WiFi se encuentran establecidas con seguridad y todos los terminales identificados por el eNodeB, puede comenzar el registro en Núcleo de Red. Para ello se realizará las conexiones y autenticaciones con el MME y S-GW y después se procederá a la creación de las portadoras que transportarán los datos de usuario.

Para poder llevar a cabo la comunicación entre LTE y WiFi Direct se ha elegido que el punto de unión entre ambas tecnología sea la capa MAC en WiFi y PDCP en LTE por varias razones:

- Los paquetes de LTE están cifrados su integridad protegida en la capa PDCP por lo que la información solo puede ser descifrada en el destino.
- A nivel de PDCP se pueden llevar a cabo tareas de concatenación o segmentación de los PDUs según la calidad del enlace físico
- MAC ofrece una transmisión robusta y segura.

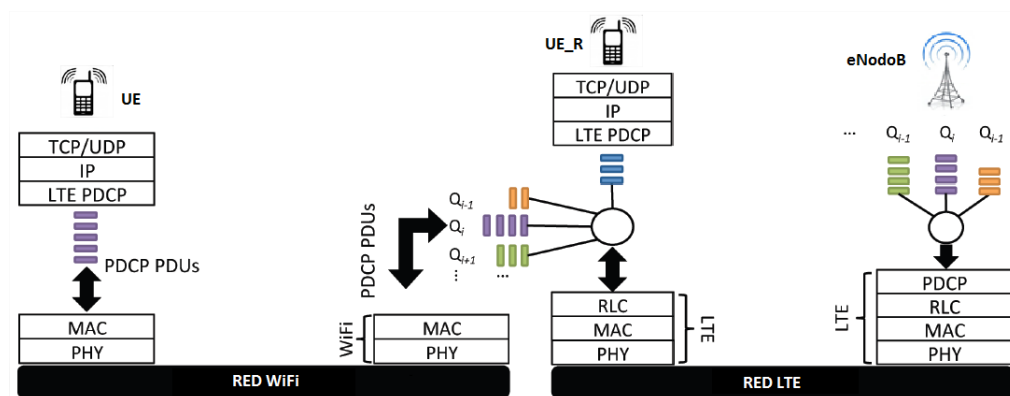


Figura 6.21 Esquema unión redes WiFi- LTE

---

## 7 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

### 7.1 INTRODUCCIÓN

A continuación se han realizado unas simulaciones que reflejan las dos soluciones propuestas, terminal intermedio LTE y terminal intermedio WiFi.

Para ello se ha utilizado el mismo escenario que en los puntos anteriores y se han escogido 6 puntos de referencia (A-F) dotados de cobertura por parte de un eNodoB. Se desea comprobar si las soluciones propuestas son viables en cuanto a niveles de cobertura en un escenario real.

Debido a las limitaciones de la herramienta de simulación, los cálculos para el terminal intermedio LTE son más precisos y se puede realizar un estudio con más profundidad, siendo posible la simulación conjunta de la cobertura del eNodoB y el UE\_R. Para el terminal intermedio WIFI el estudio únicamente puede realizarse simulando un transmisor WIFI situado en los diferentes puntos y reflejando la cobertura que puede proporcionar este terminal.

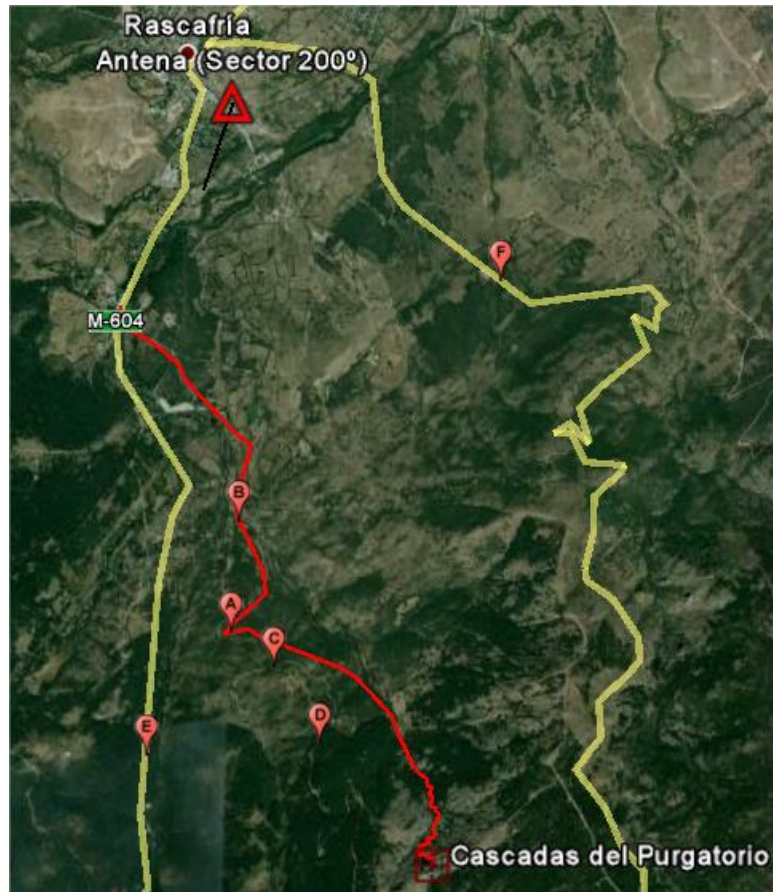


Figura 7.1 Puntos de referencia para la simulación

## 7.2 SOLUCIÓN CON TERMINAL INTERMEDIO LTE

Los parámetros básicos del sistema radiante del eNodoB, del terminal repetidor y del UE que se han escogido para las simulaciones son los mismos que se han utilizado con anterioridad. La única diferencia es que el terminal UE\_R se ha configurado en el simulador como si fuera un nodo, para poder realizar el estudio de cobertura.



Parámetros antena	LTE 800MHz
Altura de la antena	27 m
Orientación de la antena	200°
Tilt	5°
Potencia salida	40 W
Pérdidas	10 dB
Antena	3G/4G Antena Ganancia = 17,5 dBi 65°
Polarización	Vertical
Frecuencia	842 MHz

Parámetros UE_R	LTE 800MHz
Altura de la antena	1.5 m
Orientación de la antena	Omnidireccional
Tilt	0°
Potencia salida	200 mW
Pérdidas	3 dB
Antena	3G/4G Antena Ganancia 2 dBi Omnidireccional
Polarización	Vertical
Frecuencia	801 MHz

Parámetros terminal	LTE 800MHz
Altura de la antena	1.5 m
Pérdidas	3 dB
Potencia transmisión	23 dBm
Antena	3G/4G Antena Ganancia 2 dBi Omnidireccional
Polarización	Vertical
Frecuencia	801 MHz
RSRP threshold	-110 dBm

Tabla 7.1 Parámetros del UE, UE\_R y eNB

En todas las simulaciones llevadas a cabo, el terminal UE\_R tiene un alcance medio, con un nivel de señal bueno o muy bueno de 500 metros, llegando en algunos casos, en función del terreno, hasta los 1000 metros. Como se puede ver en las simulaciones en algunos casos, por la orografía del terreno, el UE\_R puede cubrir distancias mayores, pero es estos casos no se puede garantizar la calidad de la señal, ya que dependerá de numerosos factores ambientales, de carga de usuarios, del terminal móvil etc.

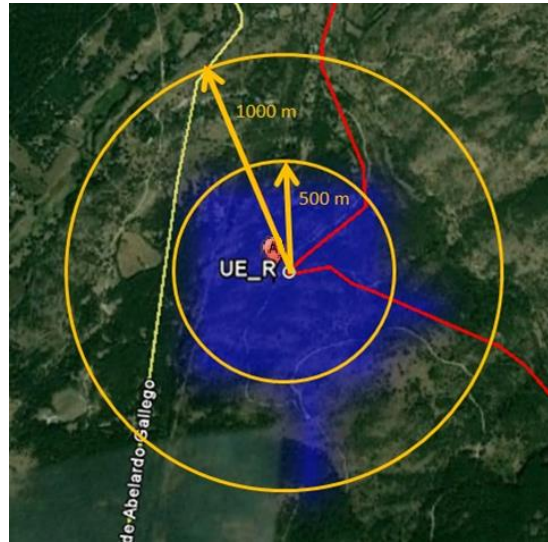


Figura 7.2 Alcance medio del UE\_R LTE

Mediante la utilización de un solo UE\_R es imposible cubrir todas las zonas que no tiene cobertura. Por ello cuantos más usuarios estén en las zonas con cobertura más probabilidad habrá de que uno de estos terminales pueda transformarse en un UE\_R.

Realizando una comparación de cobertura entre los resultados obtenidos situando el UE-R en los seis puntos de referencia de la **Figura 7.3** y la cobertura del nodo sin que exista un UE\_R de la **Figura 5.10**, puede observarse que al introducir un terminal UE\_R la zona de cobertura que proporciona el eNB se mantiene similar pero se ve reducido el nivel de señal. Esta reducción del nivel de señal es debido a que en la zona se produce una mayor interferencia provocada por el repetidor. El repetidor transmite la señal en todas direcciones, por lo que el eNodeB recibirá también su señal repetida, lo que provoca una ligera pérdida de las capacidades del nodo. Para el nodo esta señal recibida será como un rebote de la señal que él ha transmitido.

A pesar de la reducción de los niveles de señal, sigue cubriendo la zona con unos niveles aceptables, viéndose incrementada la cobertura en algunas zonas problemáticas gracias al UE\_R.

Lo ideal en un despliegue de red es que el solape entre los nodos sea lo mínimo posible, lo justo para que se pueda producir el handover entre celdas de una manera segura. En la **Figura 7.4** se muestran los solapes existentes entre el eNodeB y el UE\_R. En la zona verde el UE únicamente vería una celda, mientras que en la zona marrón tendría señal de la celda donante y del UE\_R. Por las

limitaciones a la hora de transmitir la señal y la aleatoriedad en la situación de los UEs y UEs\_R no se puede predecir el solape que se va a producir, lo que conlleva en algunos casos, como los puntos C y D, un solape excesivo que reduce la calidad y nivel de la señal. En cada zona de solape, existirá una celda que será la que mejor nivel de señal puede proporcionar al UE, y por tanto, será la celda servidora, como se puede ver en la **Figura 7.5**.

A pesar de la reducción de los niveles de señal, sigue cubriendo la zona con unos niveles aceptables, viéndose incrementada la cobertura en algunas zonas problemáticas gracias al UE\_R.

El punto que mejor refleja la mejora de cobertura es el punto D. En este punto y gracias a la situación de UE\_R quedaría cubierta una gran parte de la zona sin cobertura inicial.

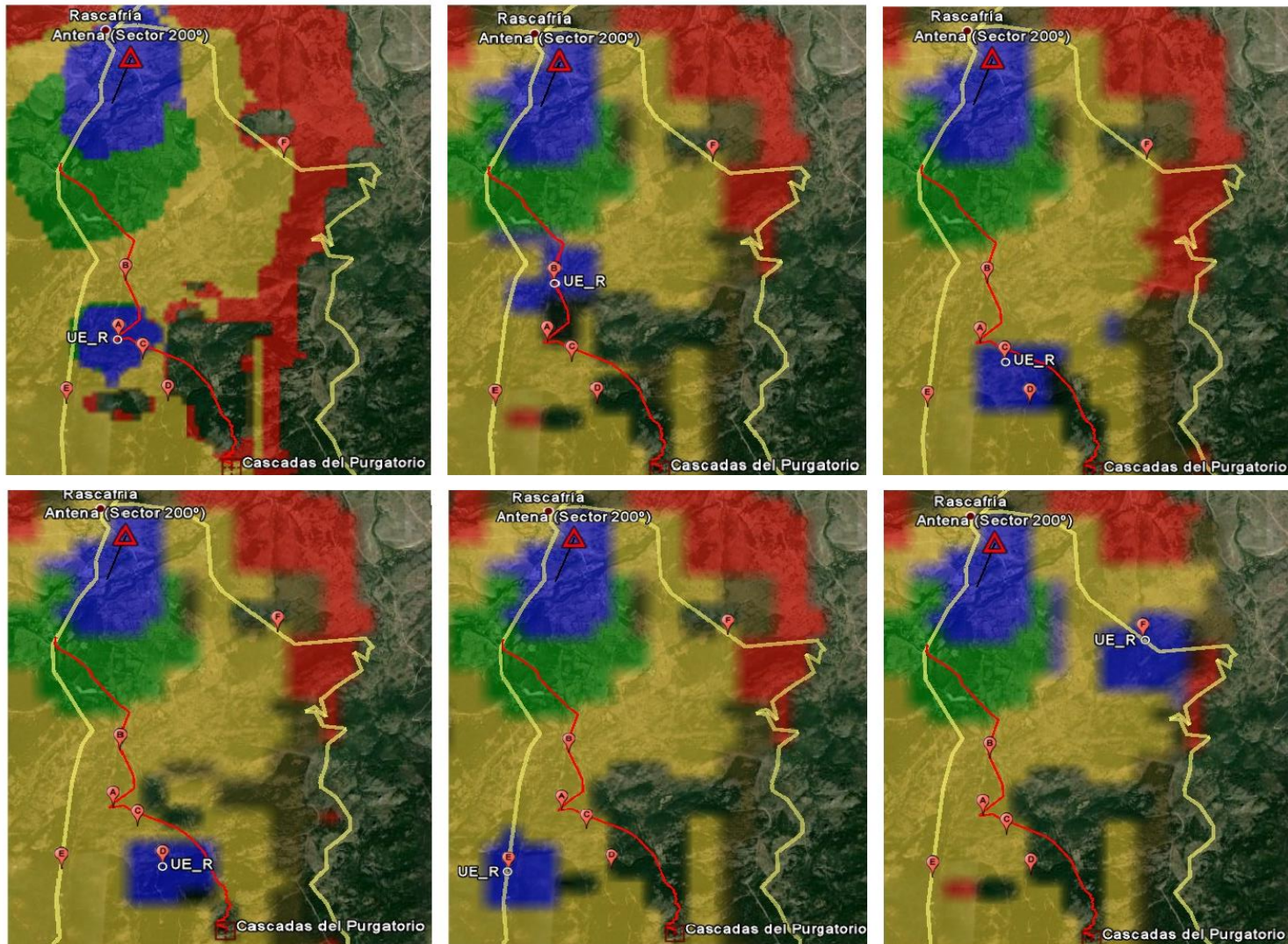


Figura 7.3 Comparación de los diferentes puntos mediante la utilización de un terminal intermedio LTE



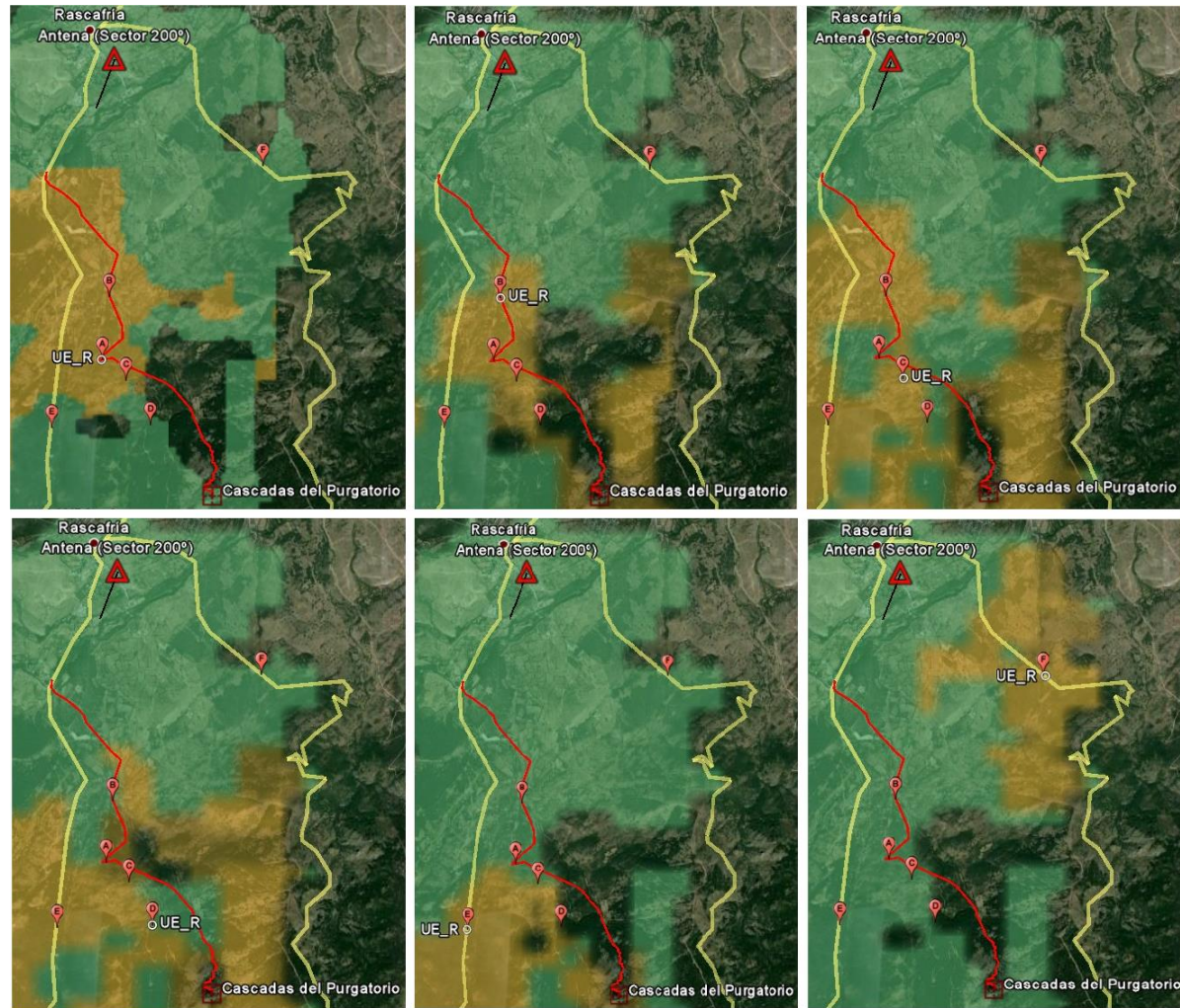


Figura 7.4 Solape de celdas con terminal intermedio LTE



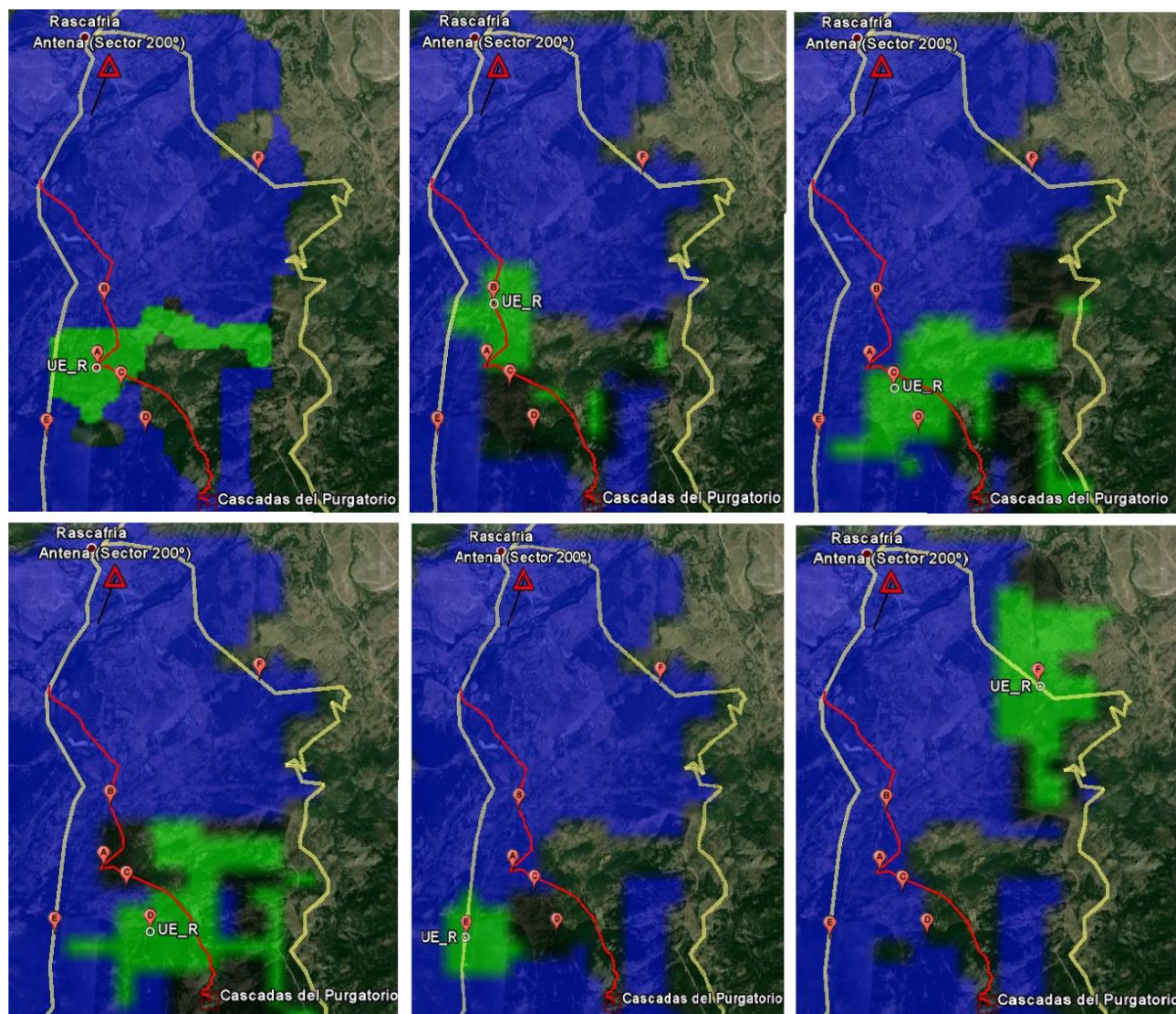


Figura 7.5 Celda mejor servidora con terminal intermedio LTE

### 7.3 SOLUCIÓN CON TERMINAL INTERMEDIO WiFi

Para la simulación del terminal intermedio WiFi, debido a las limitaciones del simulador, no ha sido posible simular la cobertura del sistema LTE y WiFi de manera conjunta. Lo que se ha realizado ha sido simular, con las características propias de un terminal móvil WiFi, la cobertura que este podría proporcionar en los puntos de referencia de la **Figura 7.1**.

Parámetros UE_R	WiFi (b/g/n)
Altura de la antena	1.5 m
Orientación de la antena	Omnidireccional
Potencia salida	100 mW
Pérdidas	3 dB
Antena	WiFi 9dBi Omnidireccional
Polarización	Vertical
Frecuencia	2442MHz

Tabla 7.2 Parámetros UE\_R WiFi

Parámetros terminal	WiFi (b/g/n)
Altura de la antena	1.5 m
Pérdidas	3 dB
Antena	WiFi 9dBi Omnidireccional
Polarización	Vertical
Frecuencia	2442MHz
Umbral de recepción	-90 dBm

Tabla 7.3 Parámetros terminal WiFi

En las simulaciones de la **Figura 7.8** puede verse la comparativa de cobertura que proporciona un terminal WiFi en los diferentes puntos del estudio.

<span style="display:inline-block; width:15px; height:15px; background-color:red; border:1px solid black;"></span>	De -90 dBm a -72 dBm	Malo
<span style="display:inline-block; width:15px; height:15px; background-color:yellow; border:1px solid black;"></span>	De -72 dBm a -62 dBm	Regular
<span style="display:inline-block; width:15px; height:15px; background-color:blue; border:1px solid black;"></span>	Mayor de -62 dBm	Bueno

Figura 7.6 Niveles de señal WiFi

En la **Figura 7.7** tomando como ejemplo el punto A, al igual que con el terminal intermedio LTE, se pueden observar muestras con un nivel medio de señal (zona amarilla), donde el UE\_R WiFi cubre una zona aproximada con un radio de 500 m. Con niveles malos de señal (zona roja), donde se seguramente existan problemas de cobertura y calidad de la señal, podemos tener muestras a más de 1000 m.

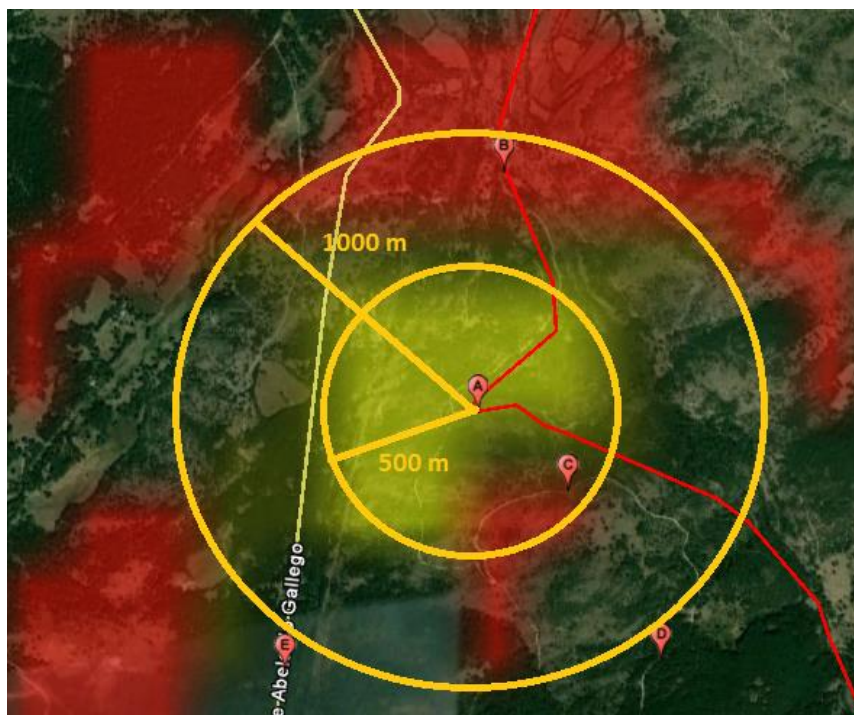


Figura 7.7 Alcance medio del UE\_R WiFi

Observando las medidas de los diferentes puntos en la **Figura 7.8**, existe una relación clara entre la calidad de la señal y la complejidad del terreno. En los puntos donde el terreno es más llano y despejado, por ejemplo el punto B, la calidad de la señal y su propagación son mejores. Debido a la frecuencia que utiliza la tecnología WiFi, 2.4 GHz, su propagación se ve afectada en mayor medida por los accidentes del terreno. Esto puede resultar un factor importante, al estar buscando una solución efectiva en terrenos montañosos y con vegetación.



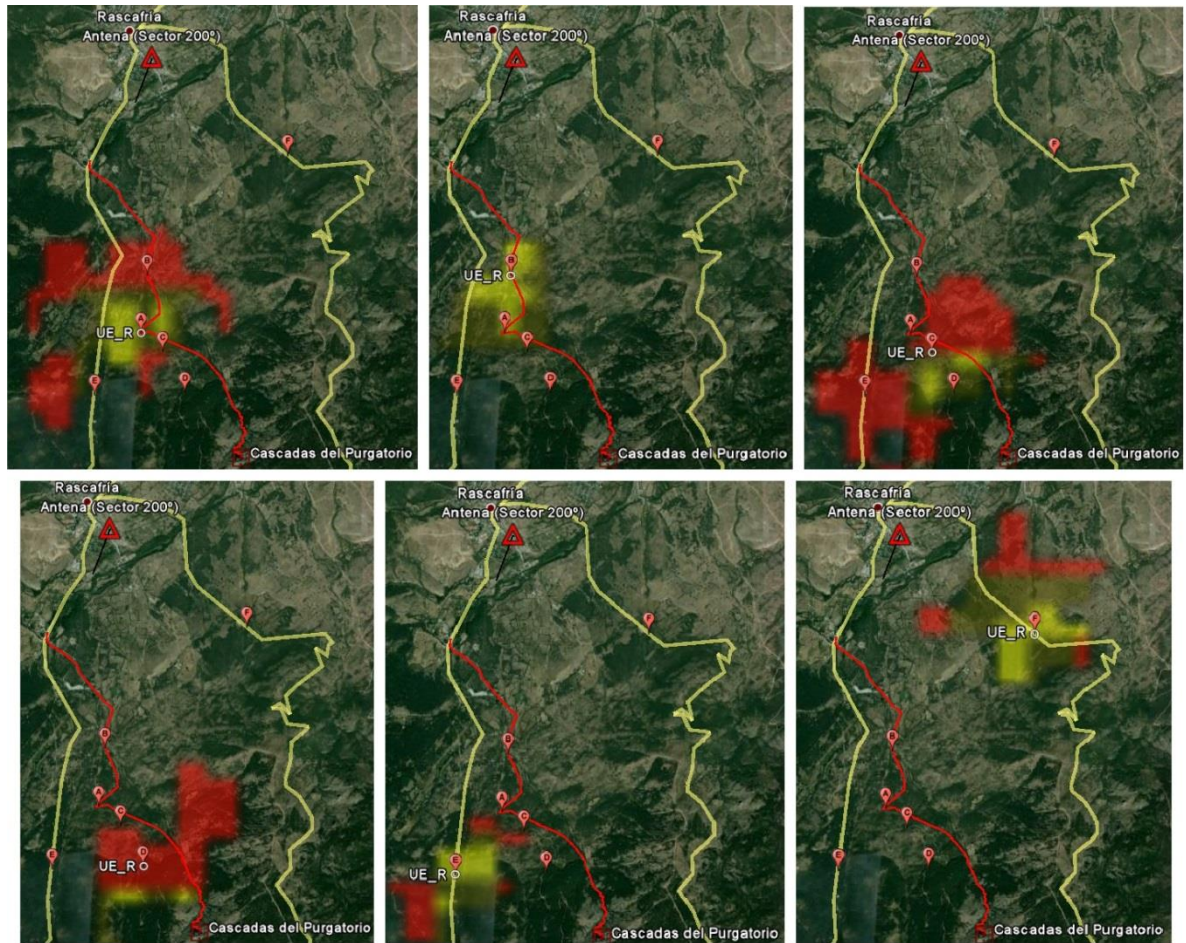


Figura 7.8 Coberturas del terminal intermedio WiFi

Una de las ventajas que tiene la utilización de redes WiFi, es la facilidad que podría existir para realizar una combinación de diferentes UE\_R como puntos de acceso de una gran red, pudiendo realizar una combinación de cobertura. De esta manera se podría cubrir una gran parte de la zona del estudio sin cobertura, aunque los niveles de señal en muchas zonas podrían ser insuficientes. Existen otras ventajas como la menor complejidad a la hora de implementar una solución mediante WiFi, ya que el sistema está diseñado para poder funcionar entre terminales o que al utiliza un sistemas que utiliza una banda de frecuencias diferente de LTE se evitarían todo tipo de interferencias.

La principal desventaja sería el uso excesivo de batería que conllevaría la utilización del WiFi. Sería necesario mantener la conexión WiFi constantemente encendida para poder realizar la búsqueda y las conexiones.

Otro inconveniente sería la dificultad para llevar a cabo la facturación de la llamada de voz o de los datos. El terminal que está conectado a la red LTE no es el que realiza las llamadas o utiliza los datos, por lo que sería necesario diseñar un método de tarificación entre la red WiFi y LTE.

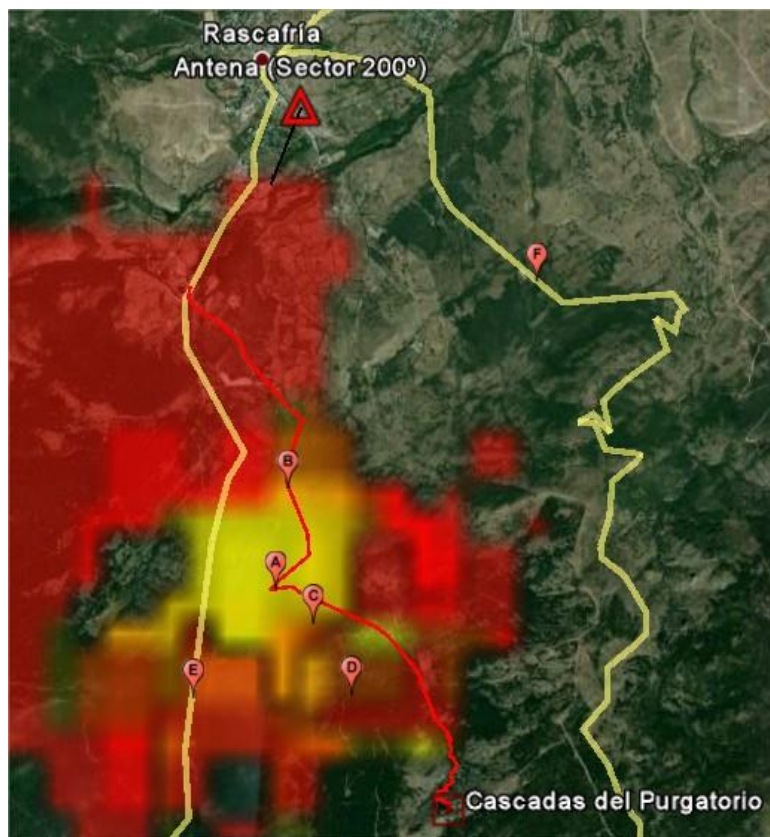


Figura 7.9 Combinación puntos A-E

## 7.4 RESULTADOS

Después de todos los resultados teóricos y las simulaciones hay que decantarse por un modelo, para ello se van a utilizar unos parámetros comunes para realizar una comparación entre el terminal intermedio con LTE o con WiFi.

Con dicho objetivo se han utilizado los siguientes parámetros:

- Distancia: se comparará la zona que es capaz de cubrir cada modelo con un nivel óptimo.
- Velocidad: velocidades teóricas que cada modelo sería capaz de proporcionar.
- Viabilidad económica: coste económico de implementar las tecnologías.

- Infraestructura: que conjunto de elementos o servicios son necesarios para el funcionamiento del modelo.
- Banda: frecuencia a las que trabajan los modelos.
- Licencia: facilidad a la hora de utilizar la banda de frecuencia.
- Handover: posibilidades de traspaso de una celda o UE\_R a otra.
- Complejidad: dificultad de introducir cambios en los estándares y las redes
- Usuarios: número de usuarios simultaneas y facilidad para incluir nuevos usuarios

#### 7.4.1 ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS

A tenor de la comparativa realizada en la **Tabla 7.4**, la opción que considero viable es la utilización de un terminal intermedio LTE.

El aspecto más importante es poder cubrir mediante la utilización de terminales intermedios la mayor parte del terreno posible. Esto lo lleva a cabo de una manera más eficiente LTE, ya que la distancia que un UE\_R es capaz de cubrir con unos niveles de señal aceptables es mayor, debido principalmente a la frecuencia que utiliza.

La velocidad puede quedar en un segundo plano, ya que lo que se pretende es dotar de cobertura la zona y poder estar comunicado, aun así LTE podría ser superior en distancias medias y largas. Seguramente mediante WiFi en distancias cortas y utilizando el estándar 802.11n se obtendría unas buenas velocidades.

La viabilidad económica va muy ligada a la infraestructura, mientras que para la utilización de la solución con WiFi únicamente serían necesarios cambios a nivel de software, para la utilización de la solución LTE se requeriría implementar todo lo necesario para la utilización de MBSFN, equipos, nuevas interfaces y software. Si el operador no dispone de estos equipos la inversión sería alta, pero esta inversión podría ser aprovechada no solo para la extensión de cobertura con el modelo expuesto en el proyecto, sino para la implementación de nuevos servicios, como puede ser la IPTV [51].

	LTE	WiFi
Distancia	<p>Menos de 500 m: niveles de señal muy buenos.</p> <p>Radio de 500 m: niveles de señal buenos, con calidad suficiente para obtener un buen <i>throughput</i>.</p> <p>Radio de 1000 m: los niveles de señal dependen de la dificultad del terreno, teniendo niveles medios/bajos de señal.</p> <p>Radio de más de 1000m: niveles de señal muy bajos, la comunicación sería muy complicada de llevar a cabo.</p>	<p>Menos de 500 m: en las inmediaciones del terminal los niveles de señal serán muy bueno, sufrirán una rápida degradación al alejarse del UE_R</p> <p>Radio de 500 m: ofrece unos niveles de medio, en este radio ya comienza a afectar de manera importante la vegetación y dificultad del terreno</p> <p>Radio de 1000 m: los niveles de señal son bajos/muy bajos, por lo que la comunicación será difícil. Se crean huecos de cobertura como se aprecia en la <b>Figura 6.7</b>.</p> <p>Radio de más de 1000m: niveles de señal muy bajos, la comunicación sería prácticamente imposible.</p>
Velocidad	<p>Al utilizar LTE 800 Mhz, del que las operadoras disponen de 10MHz de ancho de banda, la velocidad máxima teórica será es de 75 Mbps. La velocidad real será mucho menor debido a que las zonas que estamos del estudio son lugares niveles de señal medios y alejados del eNB. A todo esto hay que añadir la introducción del UE_R y la utilización de MBSFN.</p> <p>Por lo que no se puede obtener un valor real de la velocidad, ya que dependerá de las condiciones del medio. Se puede realizar una estimación en la que un valor máximo serían 20 Mbps</p>	<p>Al utilizar 2 tecnologías diferentes, cual es la que ofrece una velocidad menor. LTE puede ofrecer hasta 75Mbps, mientras que WiFi dependerá del protocolo b/g/n con velocidades máximas de 11/54/300 Mbps.</p> <p>Debido a la variedad de velocidades habría que realizar pruebas reales.</p>



<b>Viabilidad económica</b>	El coste de implementar esta solución sería alto, si el operador no dispone previamente de MBSFN en la red.	El coste sería algo más bajo que para LTE ya que sería necesario una menor modificación en la red y el estándar, WiFi ya refleja las posibilidades de unir terminales para compartir conexión.
<b>Infraestructura</b>	Sería necesario añadir la infraestructura necesaria para MBSFN, nuevos equipos, interfaces y software.	La única infraestructura necesaria es la que pueda existir previamente para LTE, nodos y equipos de red. La parte WiFi ya se encuentra implementada en todos los terminales
<b>Banda</b>	La banda de LTE 800 MHz tiene una buena propagación lo que ayuda a la hora de obtener unos mejores niveles de señal en lugares complejos	Utiliza la banda de 2.4GHz, es una banda muy alta para poder ser utilizada en entornos hostiles, como se ha podido ver en las simulaciones se comporta mal en zonas abruptas.
<b>Licencia</b>	En necesaria licencia para operar en la banda de 800 MHz, lo que dificulta la operación ya que hay que ser muy cauteloso con problemas de interferencias.	Banda libre, aun así hay que ser también precavido a la hora de introducir interferencias. La ventaja es que se pueden aprovechar los diferentes canales WiFi para buscar lo que menos número de usuarios tengan

<b>Handover</b>	No se ha reflejado la posibilidad de realizar HO entre UE_R. Sería una opción a estudiar.	No es posible realizar HO. Es necesaria una desconexión de un UE_R para conectar con otro.
<b>Complejidad</b>	El estándar LTE aún está abierto a posibles cambios, es una estándar relativamente joven con muchas mejoras posibles.	En el estándar WiFi, 802.11 b/g/n no sería posible introducir cambios, sería necesario esperar a una nueva versión.
<b>Usuarios múltiples</b>	El UE_R al retransmitir las señales de eNB, se pueden conectar a él varios usuarios. Esto solo es posible cuando ya está funcionando como UE_R, durante el proceso de transformación solo es posible un usuario.	Al funcionar el UE_R como un punto de acceso, es sencillo que varios usuarios se puedan conectar de manera simultanea

Otros	<p>En estado de escucha el consumo es bajo, ya que realizará el mismo número de conexiones que realizaría con la red.</p> <p>Existe la posibilidad de aprovechar MBSFN para otros servicios.</p> <p>El utilizar una única tecnología para el interfaz de acceso y de backhaul facilitaría la gestión de sesiones, movilidad y seguridad.</p>	<p>Alto consumo de batería del terminal al tener el interfaz WiFi constantemente conectado.</p> <p>Dificultad a la hora de facturar los consumos de los usuarios.</p>
-------	--	---

Tabla 7.4 Comparativa LTE-WiFi

## 8 PRESUPUESTO DEL PROYECTO

En el presupuesto únicamente se presenta el coste relativo al trabajo realizado y presentado en este proyecto, sin tener en cuenta otros costes, como pueden ser los atribuibles a los equipos de red, instalaciones etc.

En la **Tabla 8.1** se detalla el software utilizado tanto en el terminal móvil utilizado para las pruebas, como en el ordenador.

Utilidad	Denominación
Sistema operativo	Windows 7
Ofimática	Paquete Office
Sistema operativo móvil	Android4.4
Drive test	Netmonitor
Simulación medidas	XIRIO Online Planning Tool

Tabla 8.1 Software empleado

En la **Tabla 8.2** se incluyen los gastos relativos al personal. Se han incluido los honorarios de un ingeniero técnico de telecomunicaciones con un valor orientativo de 60€/hora según el COIT. También se han incluido los honorarios de la tutora del proyecto, en este tipo de proyectos se suele asignar un 7% del total de las horas empleadas a la labor de los tutores. En el apéndice 10.3 está incluido el cronograma con las fases del proyecto.

Los costes asociados a los equipos y software utilizados se pueden ver en la **Tabla 8.3**, se ha supuesto un periodo de depreciación de los mismos de 60 meses.

Otras partidas imputables **Tabla 8.4** son los gastos prorrateados de comunicaciones, luz, agua etc. y los gastos asociados con los desplazamientos para realizar las mediciones de cobertura.

Para finalizar, en el resumen de todo el presupuesto de la **Tabla 8.5** se añaden los costes indirectos asociados al proyecto, estimados en un 20% del total.

Nombre y Apellidos	Categoría	Dedicación	Coste persona hora	Coste (Euro)
Javier Botana Rivera	Ingeniero Junior	1100	60 €	66,000 €
Raquel Perez Leal	Ingeniero Senior	77	75 €	5,775 €
<b>Total</b>				<b>71,775 €</b>

Tabla 8.2 Coste de personal



Descripción	Coste (Euro)	% Uso dedicado proyecto	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación	Coste imputable
Equipo informático	1,000 €	100	10	60	166.67 €
Software empleado	90 €	100	10	60	31.67 €
Terminal móvil	300 €	100	0.1	60	0.50 €
<b>Total</b>					<b>198.83 €</b>

Tabla 8.3 Coste de equipos y software

Descripción	Empresa	Costes imputable
Entorno de trabajo	UC3M	600 €
Medidas de cobertura		40 €
<b>Total</b>		<b>640 €</b>

Tabla 8.4 Otros costes directos

Presupuesto Costes Totales	Presupuesto Costes Totales
Personal	71,775 €
Amortización	198.83 €
Otros costs directos	640 €
Costes indirectos	14,531 €
<b>Total (IVA Incluido)</b>	<b>87,124.83 €</b>

Tabla 8.5 Resumen de costes

---

## 9 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

Partiendo del objetivo del proyecto, que es encontrar una solución para entornos con cobertura esporádica, se han ido desgranando la situación actual de los sistemas móviles 2G y 3G para entender sus problemas. Después se ha estudiado como con LTE se podía encontrar una solución.

En el capítulo 2 del presente proyecto, se ha analizado como con las tecnologías actuales es económicamente inviable dotar de cobertura móvil todo el territorio. Con el despliegue de LTE que se ha comenzado a llevar a cabo por parte de los operadores en España y las nuevas características que LTE puede proporcionar, la cobertura puede verse mejorada respecto a las tecnologías anteriores.

La posibilidad de utilizar la banda de 800 MHz para LTE aporta una ventaja debida a su mayor propagación respecto al resto de bandas que puede utilizar LTE y también respecto a las anteriores tecnologías 2G y 3G. Esta ventaja, como se ha visto en las simulaciones permite dotar de cobertura una mayor extensión de terreno sin la necesidad de desplegar nuevos nodos. A pesar de la mejora, en algunos casos resultará insuficiente por la orografía u otras circunstancias. Unido a la utilización de la banda de 800 MHz podría desplegarse uno o varios repetidores para extender la cobertura, pero a pesar de resultar más baratos, comparándolo con el despliegue de una estación base LTE, sigue siendo económicamente inviable cubrir con repetidores todas las zonas con falta de cobertura.

Debido a que con las soluciones existentes no satisfacen los requisitos de cobertura planteados, en este proyecto se proponen nuevas soluciones para la extensión y mejora de dicha cobertura. La solución propuesta está basada en la utilización de un terminal de usuario para que actúe como un terminal intermedio repetidor entre el usuario final, que no dispondría de cobertura, y el eNodoB. Los terminales intermedios actuarían como repetidores móviles en las zonas en las que lo precisasen.

Se han tenido en cuenta dos alternativas a la hora de diseñar una solución utilizando un terminal intermedio. La primera opción es la utilización de un terminal intermedio LTE, los dos interfaces, con la red y con el usuario, utilizan la tecnología LTE. La segunda opción es utilizar un terminal WiFi, el interfaz con la red utiliza LTE, mientras que el interfaz con el usuario “sin cobertura de red” utiliza WiFi. Tras realizar diversas simulaciones en la zona de estudio y analizar las dos soluciones diseñadas, se llega a la conclusión de que la solución que aportaría unas mayores ventajas sería la utilización de un terminal intermedio LTE. La principal ventaja es que el terminal intermedio LTE podría dotar de cobertura una zona más

amplia que un terminal WiFi. El utilizar una única tecnología para el interfaz de acceso y de backhaul facilitaría la gestión de sesiones y movilidad.

Al tratarse de un estudio inicial existen diversas líneas futuras de trabajo sobre las que se podría trabajar.

La cobertura existente en cada momento en la solución elegida será variable en función del número de usuarios que se encuentran en la zona, por lo que una línea futura de trabajo podía ser estudiar el almacenamiento temporal de paquetes de datos o de mensajes de usuario para poder enviarlos en cuando se localice un usuario-repetidor. Se podría investigar a nivel de aplicación como llevar a cabo un proceso de envío retardado de los mensajes, para ello sería interesante investigar las Delay-tolerant networking (DTN). Esta línea de estudio sería muy interesante enfocarla a casos de emergencia, donde se pudiera mantener la señal de socorro a la espera para poder ser enviada en cuando se tuviera cobertura.

Otra línea de estudio sería la posibilidad de que los usuarios pudieran hacer handover entre diferentes terminales intermedios o entre un terminal intermedio y un eNodeB. Para ello sería interesante estudiar el interfaz X2, que se utiliza entre eNodosB, para estudiar la manera de llevar a cabo los traspasos de forma coordinada y sin que se produzca una pérdida de paquetes entre un eNodeB y un terminal intermedio o entre terminales intermedios.

Por último, otra línea de estudio para poder dotar de una mayor cobertura sería tener varios terminales intermedios o incluso poder formar una red mallada de terminales intermedios en la que uno o varios de ellos fueran los que tuviera acceso a la red móvil LTE. De esta manera no solo se podría aumentar el radio de cobertura, si no que se podría realizar un reparto de carga para que no fuera todo el tráfico por un único terminal y de esta manera reducir el consumo de batería. El tener una red mallada ayudaría a aumentar la calidad y fiabilidad, ya que sería posible redundar la información por caminos diferentes.

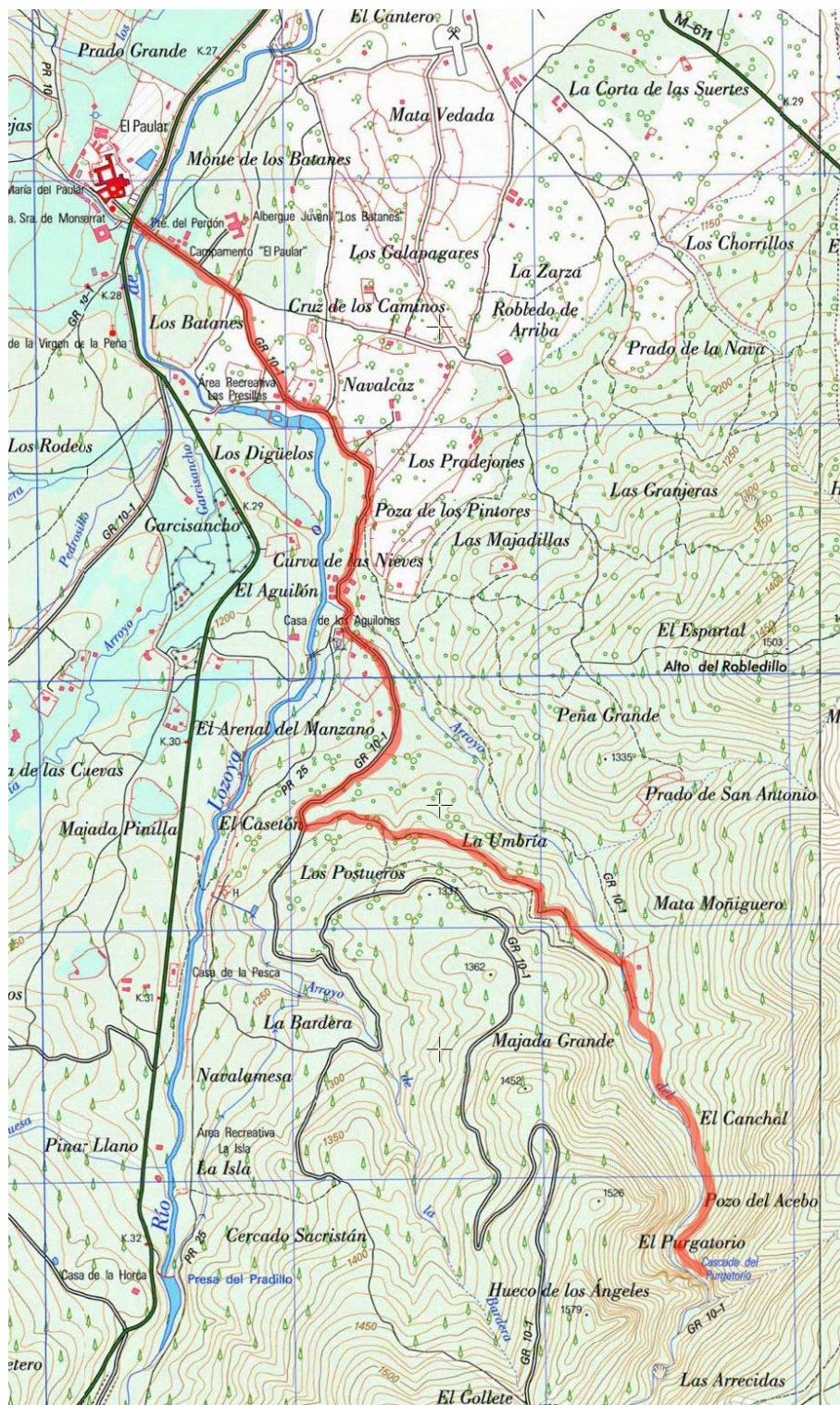
### 10.1 MASTER INFORMATION BLOCK Y SYSTEM INFORMATION BLOCK

MIB	Es lo primero que el UE busca después de que logra la sincronización del enlace descendente. El MIB incluye la información básica que necesita el UE para adquirir otra información de la celda.	El ancho de banda del canal descendente.
		La configuración del PHICH (The Physical Hybrid ARQ Indicator Channel) donde se envían los ACKs y NACKs de la transmisiones ascendentes.
		El SFN (System Frame Number) que ayuda con la sincronización y actúa como una referencia de tiempo.
		El eNodeB transmite la configuración de la antena, especifica el número de antenas de transmisión en eNodeB (1, 2, o 4), que se encuentra en el CRC del PBCH
SIB1	Transporta el mensaje SystemInformationBlockType1. Incluye información relativa al acceso del UE a la celda y de los otros SIBs.	Identificadores PLMN de la red
		El TAC (Tracking Area Code) y cell ID
		El estado de barreo de la celda, si se puede acampar en ella o no.
		El Rx Lev Min, que indica el mínimo nivel de señal en la celda para cumplir el criterio de selección.
		Los tiempos de transmisión y periodicidad de los otros SIBs.
SIB2	Contiene información del a configuración de recursos radio común para todos los UEs.	La frecuencia de la portadora del enlace ascendente y del ancho de banda del canal del enlace ascendente (en términos del número Resource Blocks, por ejemplo, n25, n50).
		La configuración del canal RACH, que ayuda al UE a iniciar el acceso aleatorio.
		La configuración del paging, ciclo de paging
		La configuración del control de la potencia en el enlace ascendente

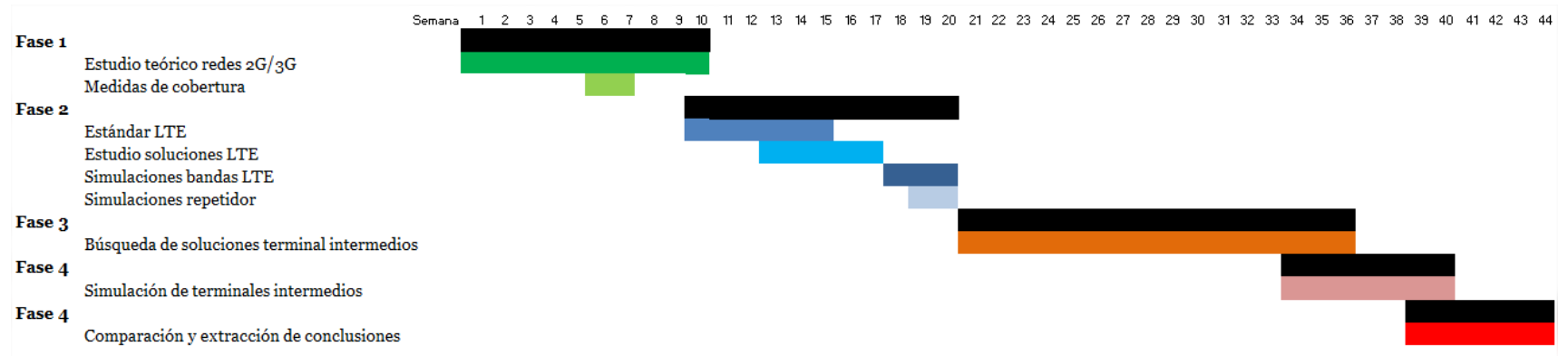
		La configuración de la SRS (Sounding Reference Signal).
		Configuración del PUCCH (Physical Uplink Control Channel) para soportar la transmisión de ACK/NACK, solicitudes de scheduling y envío del CQI .
		La configuración del PUSCH (Physical Uplink Shared Channel), como el hopping
SIB3	Contiene información común para la reelección de celdas, intra-frequency, inter-frequency, y/o inter-RAT. Esta información no es necesaria en todas la circunstancias.	
SIB4	Contiene información de las celdas vecinas intra-frequency para la reelección de intra-LTE intra-frequency. Se incluye la lista de celdas vecinas y lista de celdas prohibidas.	
SIB5	Contiene información de las celdas vecinas para la reelección de intra-LTE inter-frequency. Incluye la lista de vecinas, frecuencias de portadora, prioridades de reelección, etc.	



## 10.2 MAPA TOPOGRÁFICO DE LA ZONA DE ESTUDIO



### 10.3 CRONOGRAMA: FASES DEL PROYECTO



---

## 11 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Pedro Belmonte Espejo y Pedro Miralles Martínez. (2004, octubre) *Telefonía Movil: Impacto Ambiental y Social*. [Online].  
<http://www.ecoportal.net/content/view/full/34303>
- [2] Aplicaciones y Proyectos TIC S.L. [Online]. <http://www.aptica.es/>
- [3] Parizene. *Netmonitor*. [Online].  
<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.parizene.netmonitor&hl=es>
- [4] Jorge del Río San José, *Atlas de la brecha digital.*, 2007.
- [5] CNMC. (2014, octubre) *Informe económico de las telecomunicaciones y del sector audiovisual 2014*. [Online].  
<http://informetelecom.cnmc.es/docs/Informe%20economico%20sectorial/Informe%20Telecomunicaciones%20CNMC%202014.pdf>
- [6] Vodafone. (2015) Mapa de cobertura móvil. [Online].  
[www.vodafone.es/.vodafone.cobertura/consulta-de-cobertura-movil/](http://www.vodafone.es/.vodafone.cobertura/consulta-de-cobertura-movil/)
- [7] 3GPP, *TS 36.401: Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Architecture description.*, Versión 12.1.0, Rel-12. 12/2014.
- [8] Ramón Agustí, Francisco Bernardo y Fernando Casadevall, *LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles.*: Fundación Vodafone España, 2010.
- [9] ASCOM Tools. *LTE Guide*. [Online].  
<http://lteguide.blogspot.co.uk/2011/11/s1-interface.html>
- [10] 3GPP, *TS 23.002: Network architecture.*, Versión 12.6.0, Rel-12. 12/2014.
- [11] 3GPP, *TS 23.401: General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access.*, Versión 12.8.0, Rel-12. 03/2015.
- [12] 3GPP, *TS 36.300: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN);*



*Overall description; Stage 2., Versión 12.1.0, Rel-12. 03/2014.*

- [13] 3GPP, TS 36.104: *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception.*, Versión 12.6.0, Rel-12. 01/2015.
- [14] 3GPP, TS 36.323: *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Packet Data Convergence Protocol (PDCP) specification.*, Versión 12.0.0, Rel-12. 07/2014.
- [15] 3GPP, TS 36.322: *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Link Control (RLC) protocol specification.*, Versión 12.1.0, Rel-12. 09/2014.
- [16] 3GPP, TS 36.321: *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification.*, Versión 12.2.0, Rel-12. 07/2014.
- [17] 3GPP, TS 36.331: *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification.*, Versión 12.1.0, Rel-12. 03/2014.
- [18] 3GPP, TS 36.211: *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation.*, Versión 12.4.0, Rel-12. 01/2015.
- [19] UPM, *Comunicaciones móviles OCW Capítulo 13: Sistema LTE*. [Online]. [http://ocw.upm.es/teoria-de-la-senal-y-comunicaciones-1/comunicaciones-moviles/contenidos/Tr\\_13.pdf](http://ocw.upm.es/teoria-de-la-senal-y-comunicaciones-1/comunicaciones-moviles/contenidos/Tr_13.pdf)
- [20] Harri Holma y Antti Toskala, *Lte Advanced: 3GPP Solution for IMT-Advanced.*: John Wiley & Sons, 2012.
- [21] Ralf Kreher y Karsten Gaenger, *LTE Signaling: Troubleshooting and Optimization.*: Wiley, 2011.
- [22] Teletopix, *Random Access Procedure in LTE*. [Online]. <http://www.teletopix.org/4g-lte/random-access-procedure-in-lte>
- [23] Eventhelix, *LTE Identifiers*. [Online]. <http://www.eventhelix.com/lte/LTE-identifiers.pdf>
- [24] 3GPP, TR 36.806: *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA);*

*Relay architectures for E-UTRA.*, Versión 9.0.0, Rel-9. 04/10.

- [25] Kanchei Loa et al., IMT-Advanced Relay Standards, *Communications Magazine, IEEE*, vol. 48, Agosto 2010.
- [26] Mikio Iwamura y Hideaki Takahashi, *Relay Technology in LTE-Advanced*, vol. 12, no. 2.
- [27] 3GPP, *TR 36.912: Feasibility study for Further Advancements for E-UTRA (LTE-Advanced)*., Versión 12.0.0, Rel-12. 09/2014.
- [28] 3GPP, *TS 36.216: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer for relaying operation.*, Versión 12.0.0, Rel-12. 09/2014.
- [29] Yifei Yuan, *LTE-Advanced Relay Technology and Standardization.*: Springer Science & Business Media, 2012.
- [30] Abdallah Bou Saleh y Ömer Bulakci. (2011) A Brief Introduction to LTE-Advanced Relay Networks.
- [31] 3GPP, *TR 36.877: LTE Device to Device Proximity Services; User Equipment (UE) radio transmission and reception.*, Versión 12.0.0, Rel-12. 03/2015.
- [32] 3GPP, *TR 25.924: Opportunity Driven Multiple Access.*, Versión 1.0.0, Rel-4. 12/1999.
- [33] Qualcomm. *LTE Direct Proximity Services*. [Online]. <https://www.qualcomm.com/invention/technologies/lte/direct>
- [34] XIRIO-Online. [Online]. <https://www.xirio-online.com/>
- [35] XIRIO-Online, *Usos del terreno*. [Online]. <https://www.xirio-online.com/help/es/cartography.html>
- [36] UIT-R, *Rec. UIT-R P.526-13: Propagación por difracción*. [Online]. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.526-13-201311-I/es>
- [37] UIT-R, *Rec. UIT-R P.525-2: Cálculo de la atenuación en el espacio libre*.
- [38] M. Suneetha Rani, Subrahmanyam VVRK Behara, y K.Suresh, *Comparison of Standard Propagation Model (SPM) and Stanford University Interim (SUI) Radio Propagation Models for Long Term Evolution (LTE)*, 2009.

- [39] Sergio Gallego Martínez, *Comparación de modelos teóricos para el análisis de las pérdidas por difracción múltiple de la señal radioeléctrica con medidas experimentales en entornos urbanos.*: Universidad Politécnica de Cartagena, 2008.
- [40] UIT-R, *Rec. UIT-R P.1411-2: Datos de propagación y métodos de predicción para la planificación de los sistemas de radiocomunicaciones de exteriores de corto alcance y redes de radiocomunicaciones de área local en la gama de frecuencias de 300 MHz a 100 GHz.*
- [41] UIT-R, *Rec. UIT-R P.833-4: Atenuación debida a la vegetación.*
- [42] CNMC. (2015) *Alquiler antena telefonía móvil.* [Online]. <http://cnmcblog.es/2012/05/08/con-las-antenas-hemos-topado/>
- [43] Stephen Hayes, *3GPP Technology Standards Roadmap*, Rio de Janeiro, 2010.
- [44] Shahid Mumtaz y Mohammed Kazi, *Direct Mobile-to-Mobile Communication: Paradigm for 5G*, 2014.
- [45] Jin-Shyan Lee, Yu-Wei Su, y Chung-Chou Shen, *A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi*, 2007.
- [46] IEEE. *IEEE 802.11.* [Online]. <http://standards.ieee.org/>
- [47] WiFi Alliance. [Online]. <http://www.wi-fi.org/>
- [48] Ahmed H. Zahran, *Extended Synchronization Signals for eliminating PCI confusion in heterogeneous LTE*, vol. Wireless Communications and Networking Conference, 2012.
- [49] Xincheng Zhang y Xiaojin Zhou, *LTE-Advanced Air Interface Technology.*: CRC Press, 2012.
- [50] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, y Johan Skold, *4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband.*: Academic Press, 2011.
- [51] Arash Asadi y Vincenzo Mancuso, *WiFi Direct and LTE D2D in Action.*: Wireless Days (WD), 2013.
- [52] Arashi Asadi, Qing Wang, y Vincenzo Mancuso. (2014, Abril)

<http://arxiv.org/>. [Online]. <http://arxiv.org/abs/1310.0720v6>

- [53] Diego Fernando Rueda Pepinosa y Zoila Inés Ramos Rodríguez, *Arquitectura funcional para la implementación de mobile IPTV sobre redes LTE y LTE-Avanced*, 2012.
- [54] Narcis Cardona, Juan José Olmos, Mario García, y José F Monserrat, *3GPP LTE: Hacia la 4G móvil.*: Marcombo, 2011.
- [55] José Manuel Huidobro, *Comunicaciones Móviles. Sistemas GSM, UMTS y LTE.*: RA-MA S.A, 2012.